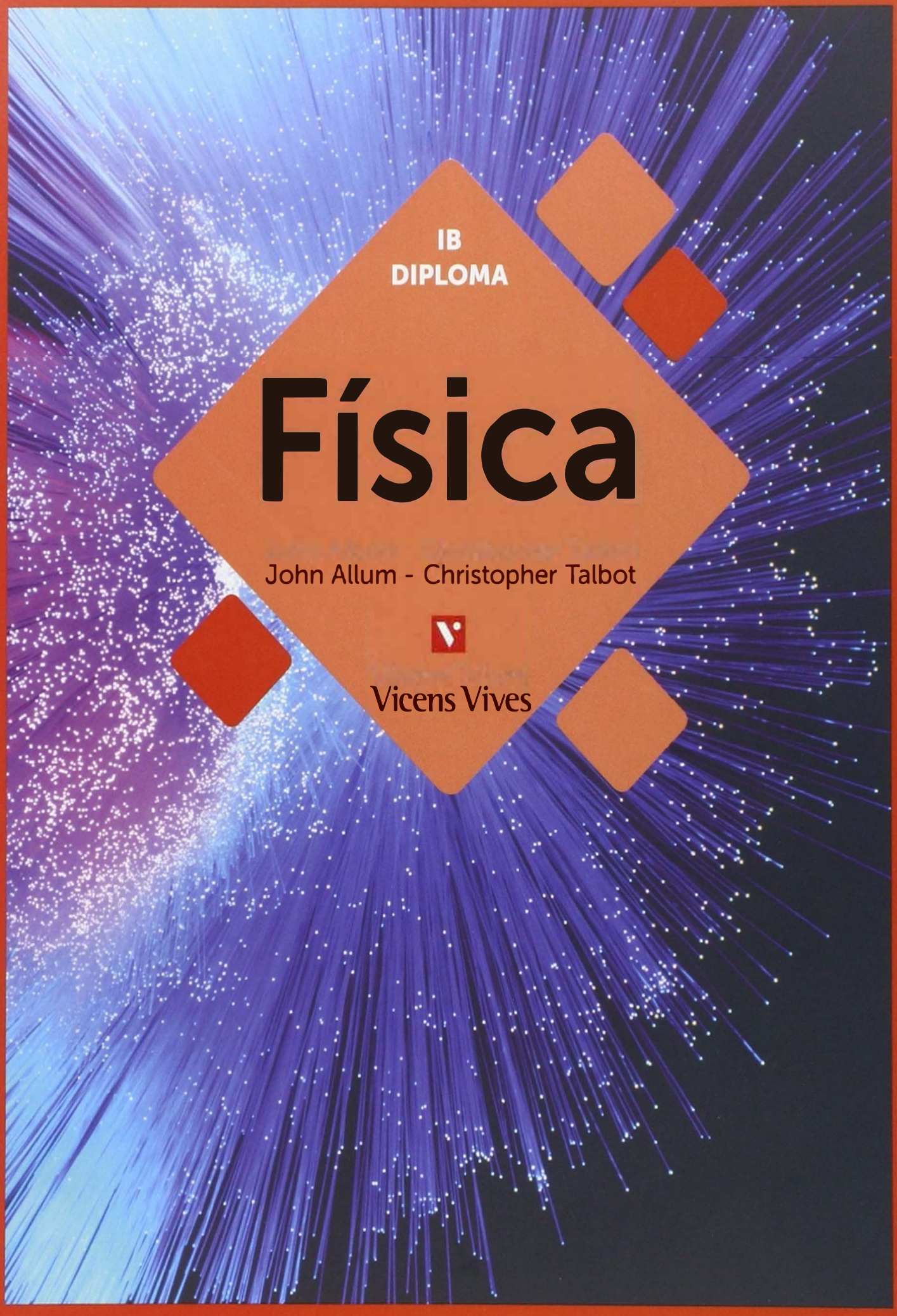

IB
DIPLOMA
Física
John Allum - Christopher Talbot
Vicens Vives

1 Medidas e incertidumbre

IDEAS FUNDAMENTALES

- Desde 1948, el Sistema Internacional de Unidades (SI) se utiliza como lenguaje mundial favorito de la ciencia y la tecnología, y refleja la mejor práctica actual de medida.
- El objetivo de los científicos es diseñar experimentos que proporcionen un «valor verdadero» de las medidas pero, debido a la precisión limitada de los aparatos de medida, normalmente los resultados se dan con un determinado grado de incertidumbre.
- Algunas magnitudes poseen dirección y módulo, mientras que otras solo poseen módulo; comprenderlo es fundamental para su correcta manipulación.

1.1 Medidas en física

Desde 1948, el Sistema Internacional de Unidades (SI) se utiliza como lenguaje mundial favorito de la ciencia y la tecnología, y refleja la mejor práctica actual de medidas

Unidades fundamentales y derivadas del SI

Para comunicarnos necesitamos compartir un mismo lenguaje, y para compartir información numérica necesitamos utilizar unas **unidades de medida** comunes. Los científicos de todo el mundo utilizan un sistema de unidades acordado internacionalmente. Es el denominado **sistema SI** (del francés «Système International»). Las unidades del SI se utilizarán a lo largo de todo el curso.

Naturaleza de la ciencia

Terminología común

Durante gran parte de los últimos 200 años muchos eminentes científicos han intentado llegar a un acuerdo sobre un sistema métrico (decimal) de unidades que pudiera ser utilizado para las medidas en la ciencia y el comercio. El hecho de disponer de un sistema común de medidas representa una valiosa ayuda para la transferencia de información científica y para el comercio internacional. En un principio podría parecer que es lo más sensato, pero existen importantes razones culturales e históricas por las que algunos países, además de algunas sociedades e individuos, se han resistido a cambiar su sistema de unidades.

El SI se formalizó en 1960 y la séptima unidad (el mol) se añadió en 1971. Anteriormente, además de las unidades del SI se utilizaban de forma generalizada las de un sistema basado en centímetros, gramos y segundos (CGS), mientras en otros países se seguía utilizando el sistema imperial (no decimal), que empleaba los pies, las libras y los segundos. Para usos cotidianos, no científicos, los habitantes de muchos países prefieren seguir utilizando los distintos sistemas que se han venido empleando popularmente durante siglos. Se ha responsabilizado a la confusión entre los distintos sistemas de unidades del fracaso de la sonda Mars en 1999, además de numerosos incidentes de aviación.

Unidades fundamentales de medida

En el SI existen **siete unidades fundamentales (básicas)**: kilogramo, metro, segundo, amperio, mol, kelvin (y candela, que *no* forma parte de este curso). En la Tabla 1.1. se enumeran las magnitudes que representan, los nombres y los símbolos de estas unidades del SI.

Se las denomina «fundamentales» porque sus definiciones no corresponden a combinaciones de otras unidades (a diferencia de los metros por segundo, por ejemplo). No es necesario aprender su definición.

Tabla 1.1 *Unidades fundamentales*

Magnitud	Nombre	Símbolo	Definición
longitud	metro	m	la distancia que atraviesa la luz en el vacío en 1/299 792 458 segundos
masa	kilogramo	kg	la masa de un cilindro de platino iridiado que se conserva en el Organismo Internacional de Pesos y Medidas en Francia
tiempo	segundo	s	la duración de 9 192 631 770 oscilaciones de la radiación electromagnética emitida entre dos niveles específicos de energía de los átomos de cesio-133
intensidad de corriente eléctrica	amperio	A	la intensidad de corriente que, cuando fluye entre dos conductores paralelos separados un metro en el vacío, produce una fuerza de 2×10^{-7}N sobre cada metro de los conductores
temperatura	kelvin	K	1/273,16 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua
cantidad de sustancia	mol	mol	una cantidad de sustancia que contiene tantas partículas como átomos hay en 12 g de carbono-12

Naturaleza de la ciencia

Perfeccionamiento de la instrumentación

La obtención de medidas rigurosas y precisas de los datos experimentales es una piedra angular de la ciencia, y estas medidas dependen además de la precisión de nuestro sistema de unidades. La definición de las unidades fundamentales depende de la habilidad de los científicos para realizar medidas muy precisas, algo que ha mejorado mucho desde que se establecieron y se utilizaron estas unidades por vez primera.

Los avances científicos pueden provenir de la investigación original en nuevas áreas, pero también están impulsados por el perfeccionamiento de las tecnologías y la capacidad para la realización de experimentos más rigurosos. La astronomía es un buen ejemplo ilustrativo: los experimentos controlados generalmente no son posibles, de modo que la creciente y rápida expansión de nuestro conocimiento del Universo se ha logrado en gran parte gracias a la mejora en los datos que podemos recibir con la ayuda de las últimas tecnologías (como los telescopios de alta resolución, por ejemplo).

Unidades de medida derivadas

Todas las demás unidades de la ciencia son combinaciones de las unidades fundamentales. Por ejemplo, la unidad de volumen es el m^3 y la unidad de la velocidad es el $m\,s^{-1}$. Las combinaciones de las unidades fundamentales se denominan **unidades derivadas**.

A veces a las unidades derivadas se les otorga su propio nombre (Tabla 1.2). Por ejemplo, la unidad para la fuerza es el $kg\,m\,s^{-2}$, al que se suele denominar newton, N. Todas las unidades derivadas se introducirán y se definirán a lo largo del curso cuando sea necesario.

Tabla 1.2 *Nombres de algunas unidades derivadas*

Unidad derivada	Magnitud	Combinación de unidades fundamentales
newton (N)	fuerza	$kg\,m\,s^{-2}$
pascal (Pa)	presión	$kg\,m^{-1}\,s^{-2}$
hercio (Hz)	frecuencia	s^{-1}
julio (J)	energía	$kg\,m^2\,s^{-2}$
vatio (W)	potencia	$kg\,m^2\,s^{-3}$
culombio (C)	carga	$A\,s$
voltio (V)	diferencia de potencial	$kg\,m^2\,s^{-3}\,A^{-1}$
ohmio (Ω)	resistencia	$kg\,m^2\,s^{-3}\,A^{-2}$
weber (Wb)	flujo magnético	$kg\,m^2\,s^{-2}\,A^{-1}$
tesla (T)	intensidad del campo magnético	$kg\,s^{-2}\,A^{-1}$
becquerel (Bq)	radiactividad	s^{-1}

Se espera que los alumnos de este curso escriban y reconozcan las unidades utilizando notación con superíndices; es decir, en la forma $m\,s^{-1}$ en lugar de m/s. Las unidades de la aceleración, por ejemplo, se expresan en la forma $m\,s^{-2}$.

En algunas ocasiones los físicos emplean unidades que no forman parte del SI. El electronvoltio, eV, por ejemplo, es una unidad de energía convenientemente pequeña que se utiliza frecuentemente en física atómica. Las unidades de este tipo se irán introduciendo a lo largo del curso cuando sea necesario. Los alumnos deberán saber convertir unas unidades en otras. Una de las conversiones más habituales es la del tiempo en años al tiempo en segundos.

Enlace con la teoría del conocimiento

Conceptos fundamentales

Como sucede con algunas unidades de medida, muchas de las ideas y de los principios que se emplean en física pueden describirse como «fundamentales». De hecho, se suele decir de la propia física que es una ciencia fundamental. Pero, ¿a qué nos referimos exactamente cuando decimos que algo es «fundamental»? Podríamos reemplazar este término por el término «elemental» o «básico», pero estos últimos no nos ayudan verdaderamente a comprender su verdadero significado.

Uno de los temas centrales de la física es la búsqueda de las partículas fundamentales, unas partículas que constituyen los pilares de construcción del universo y que no están constituidas, a su vez, por partículas más pequeñas y más simples. Otro tanto ocurre con las leyes y principios fundamentales: un principio físico no puede describirse como fundamental si puede explicarse mediante ideas «más simples». Muchos científicos también opinan que un principio no puede ser verdaderamente fundamental si no es relativamente simple de expresar (probablemente utilizando el lenguaje matemático). Si es demasiado complejo, tal vez es porque todavía no se ha descubierto la simplicidad subyacente.

Los principios fundamentales deben «cumplirse» en todo momento y lugar. Los principios fundamentales que consideramos actualmente han sido comprobados una y otra vez para verificar si son verdaderamente fundamentales. No obstante, *siempre* cabe la posibilidad de que, en el futuro, lo que se consideraba que era un principio fundamental acabe descubriéndose que se puede explicar mediante ideas más simples.

Consideremos dos leyes físicas muy conocidas. La *ley de Hooke* describe el estiramiento que se produce en algunos materiales como consecuencia de la acción de una fuerza sobre ellos. Se trata de una ley simple, pero no es una ley fundamental, porque no siempre es cierta. La *ley de la conservación de la energía* también es simple, pero en este caso sí se describe como fundamental, porque no se conocen excepciones.

Notación científica y multiplicadores

Notación científica

Cuando escribimos o comparamos números muy grandes o muy pequeños es conveniente utilizar la **notación científica** (también conocida como *«forma estándar»*).

En la notación científica cada número se expresa en la forma $a \times 10^b$, donde a es un número decimal mayor que 1 y menor que 10, y b es un número **entero** denominado **exponente**. Por ejemplo, en notación científica el número 434 se escribe $4{,}34 \times 10^2$; análogamente: 0,000 316 se escribe $3{,}16 \times 10^{-4}$.

La notación científica es útil para dejar claro el número de cifras significativas (véase la sección siguiente). También se utiliza para introducir y mostrar en pantalla números muy grandes o muy pequeños cuando se efectúan cálculos. La notación $\times 10^x$ o la letra *E* se suelen utilizar en los cálculos para representar «tantas veces diez elevado a...». Por ejemplo: 4,62*E*3 equivale a $4{,}62 \times 10^3$, es decir, 4620.



La generalización del uso de esta forma estándar de representación de los datos numéricos es de gran importancia para la comunicación de la información científica entre los distintos países.

Tabla 1.3
Multiplicadores métricos (SI) estándar

Prefijo	Abreviatura	Valor
peta	P	10^{15}
tera	T	10^{12}
giga	G	10^9
mega	M	10^6
kilo	k	10^3
deci	d	10^{-1}
centi	c	10^{-2}
milli	m	10^{-3}
micro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
pico	p	10^{-12}
femto	f	10^{-15}

Multiplicadores métricos estándar

En el lenguaje habitual empleamos los términos «miles» y «millones» para representar números grandes. Los equivalentes científicos son los prefijos kilo- y mega-. Por ejemplo, un kilovatio son mil vatios y un megajulio es un millón de julios. Análogamente, una milésima y una millonésima se representan científicamente mediante los prefijos mili- y micro-. En la Tabla 1.3. se muestra una lista de los prefijos estándar. Esta tabla figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Enlace con la teoría del conocimiento

Para una comunicación efectiva se necesita un lenguaje y una terminología comunes

¿Qué ha influido sobre el lenguaje común utilizado en la ciencia? ¿Hasta qué punto disponer de una aproximación estándar a la medición facilita el uso compartido del conocimiento en física?

Parece bastante evidente que la comunicación entre los científicos es mucho más fácil si comparten un lenguaje científico común (símbolos, unidades, notación científica estándar, etc., tal como se ha planteado en este capítulo). Pero, ¿son nuestros métodos modernos de comunicación científica y terminología los mejores posibles o pueden mejorarse? ¿Hasta dónde son un mero accidente histórico basado en los lenguajes y culturas específicas que dominaban en la época de su desarrollo?

Cifras significativas

Cuanto más precisa es una medida, mayor es el número de cifras significativas (dígitos) que pueden emplearse para representarla. Por ejemplo, una intensidad de corriente eléctrica expresada en la forma 4,20 A (a diferencia de 4,19 A o 4,21 A) sugiere una mayor precisión que la expresada en la forma 4,2 A.

Las **cifras significativas** son todos los dígitos de un dato que tienen significado, ya estén antes o después de la coma, incluyendo los ceros. Sin embargo, en ocasiones los ceros se utilizan sin más, lo que puede llevar a confusión. Por ejemplo, si nos dicen que el aeropuerto más cercano está a 100 km, puede que dudemos de si está aproximadamente a 100 km o «exactamente» a 100 km. Es un buen ejemplo de por qué es útil la notación científica. Si empleamos la forma $1{,}00 \times 10^3$ km dejamos claro que hay exactamente tres cifras significativas. En cambio 1×10^3 representa mucha menor precisión.

Cuando efectuamos *cálculos*, el resultado no puede tener más precisión que los datos utilizados para calcular ese resultado. Como regla general (y simplificada), cuando respondemos preguntas o procesamos datos experimentales, el resultado debe contener el mismo número de cifras significativas que los datos utilizados. Si el número de cifras significativas no es el mismo para todos los datos, el número de cifras significativas de la respuesta debe ser el del menos preciso de los datos (el que tiene menor número de cifras significativas). Esto se ilustra en el Ejemplo resuelto 1.

Ejemplo resuelto

1 Utiliza la ecuación

$$P = \frac{mgh}{t}$$

para determinar la potencia, P, de un motor eléctrico que levanta una masa, m, de 1,5 kg, una altura, h, de 1,128 m en un tiempo, t, de 4,79 s. ($g = 9{,}81\,\text{m s}^{-2}$)

$$P = \frac{mgh}{t} = \frac{1{,}5 \times 9{,}81 \times 1{,}128}{4{,}79}$$

Una calculadora mostraría en pantalla una respuesta de 3,4652..., pero esta respuesta sugiere una precisión muy alta que no se puede justificar a partir de los datos. El dato que contiene el menor número de cifras significativas es 1,5 kg, por tanto la respuesta debe contener este mismo número de cifras significativas:

$P = 3{,}5\,\text{W}$

«Redondeo» hasta un número apropiado de cifras significativas

El «redondeo», como en el Ejemplo resuelto 1, debe realizarse al final de la cadena de cálculos, cuando ha de darse la respuesta. Si se deben efectuar más cálculos a partir de dicha respuesta, hay que utilizar todos los dígitos que aparecían previamente en pantalla. La respuesta debe redondearse nuevamente hasta el número correcto de cifras significativas. En ocasiones, este proceso puede producir pequeñas inconsistencias aparentes entre las respuestas.

Órdenes de magnitud

La física es la ciencia fundamental que intenta explicar cómo y por qué todo lo que hay en el Universo se comporta de la forma en que lo hace. Los físicos lo estudian todo, desde los componentes más pequeños de los átomos hasta los objetos más distantes de nuestra galaxia y más allá (Figura 1.1).

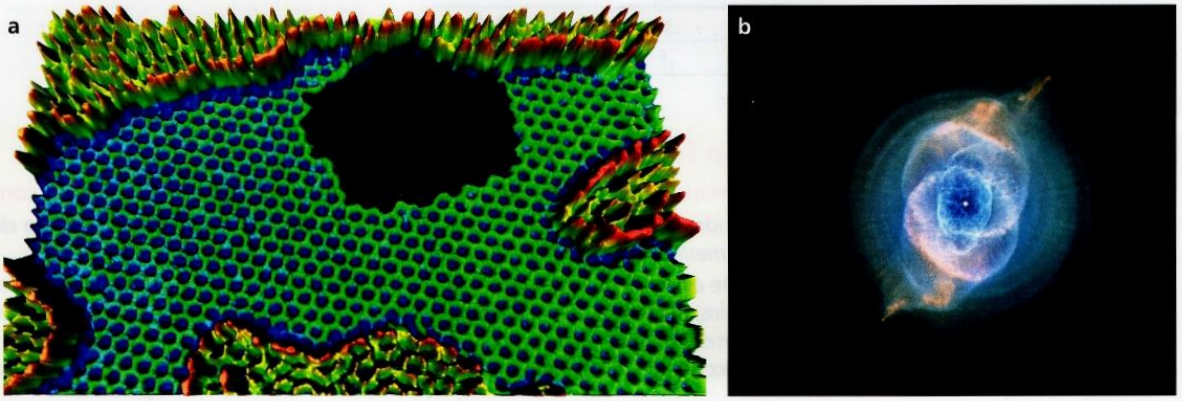


Figura 1.1
a *El comportamiento de los átomos individuales de grafeno (un material constituido por una única capa de átomos de carbono) puede observarse mediante el uso de un tipo especial de microscopio electrónico*
b *Nubes complejas de gas y polvo en la nebulosa del Ojo de Gato, a 3000 años luz de distancia*

La física es una disciplina **cuantitativa** que hace un gran uso de las matemáticas. Las medidas y los cálculos normalmente se refieren al mundo que podemos observar a nuestro alrededor (el mundo **macroscópico**), pero es posible que nuestras observaciones requieran explicaciones **microscópicas** que frecuentemente incluyen el conocimiento de las moléculas, los átomos, los iones y las partículas subatómicas. La **astronomía** es una rama de la física que estudia el otro extremo, en el que aparecen cantidades muchísimo mayores que las que podamos experimentar en nuestra vida cotidiana.

El estudio de la física, por tanto, implica trabajar tanto con números muy grandes como con números muy pequeños.

Cuando los números se alejan tanto de nuestra experiencia cotidiana puede ser difícil apreciar su verdadero tamaño. Por ejemplo, se cree que la edad del Universo es del orden de 10^{18} s, pero ¿cómo de grande es este número? La única forma sensata de responder a esta pregunta es comparando esta cantidad con alguna otra que nos resulte más familiar. Por ejemplo, la edad del Universo equivale a 100 millones de vidas humanas.

Cuando comparamos cantidades de tamaños (**magnitudes**) muy diversos, para simplificar solemos hacer aproximaciones a la potencia de 10 más cercana. Cuando un número se aproxima y se estima hasta la potencia de 10 más cercana, se dice que se está dando su **orden de magnitud**. Por ejemplo, cuando comparamos la vida de un ser humano (cuyo promedio general es de unos 70 años) con la edad del Universo ($1{,}4 \times 10^{10}$ años), podemos utilizar el cociente aproximado $10^{10}/10^{2}$. En otras palabras, la edad del Universo es de unas 10^{8} vidas humanas, o también podríamos decir que hay ocho órdenes de magnitud entre ambos valores.

Algunos ejemplos más:

- La masa de un átomo de hidrógeno es $1{,}67 \times 10^{-27}$ kg. En orden de magnitud es 10^{-27} kg.
- La distancia a la estrella más cercana (*Proxima Centauri*) es $4{,}01 \times 10^{16}$ m. En orden de magnitud es 10^{17} m. (Fíjate: log de $4{,}01 \times 10^{16} = 16{,}60$, que está más cerca de 17 que de 16).
- Un día contiene 86 400 segundos. En orden de magnitud son 10^5 s

En las Tablas 1.4 a 1.6 se muestran los intervalos de masas, distancias y tiempos que aparecen en el Universo. Es muy recomendable que veas simulaciones de ordenador en las que se representen estos intervalos.

Tabla 1.4 *Intervalo de masas que aparece en el Universo*

Objeto	Masa/kg
el Universo observable	10^{53}
nuestra galaxia (Vía Láctea)	10^{42}
el Sol	10^{30}
la Tierra	10^{24}
un avión comercial grande	10^{5}
un humano adulto alto	10^{2}
un libro grande	1
una gota de lluvia	10^{-6}
un virus	10^{-20}
un átomo de hidrógeno	10^{-27}
un electrón	10^{-30}

Distancia	Tamaño/m
distancia al extremo del Universo observable	10^{27}
diámetro de nuestra galaxia (Vía Láctea)	10^{21}
distancia a la estrella más cercana	10^{16}
distancia al Sol	10^{11}
distancia a la Luna	10^{8}
radio de la Tierra	10^{7}
altitud de crucero de un avión	10^{4}
altura de un niño	1
crecimiento de un cabello humano en un día	10^{-4}
diámetro de un átomo	10^{-10}
diámetro de un núcleo	10^{-15}

Tabla 1.5 *Intervalo de distancias que aparece en el Universo*

Periodo de tiempo	Intervalo de tiempo/s
edad del Universo	10^{18}
tiempo transcurrido desde la extinción de los dinosaurios	10^{15}
tiempo transcurrido desde la aparición del ser humano sobre la Tierra	10^{13}
tiempo transcurrido desde la construcción de las pirámides de Egipto	10^{11}
duración de una vida humana en promedio	10^{9}
un día	10^{5}
tiempo que transcurre entre dos latidos humanos	1
periodo correspondiente a un sonido de alta frecuencia	10^{-4}
tiempo que tarda la luz en atravesar una habitación	10^{-8}
periodo de oscilación de una onda de luz	10^{-15}
tiempo que tarda la luz en atravesar un núcleo	10^{-23}

Tabla 1.6 *Intervalo de tiempos que aparece en el Universo*

Estimación

A veces no disponemos de los datos necesarios para efectuar un cálculo exacto o bien puede ocurrir que tengamos que dar una respuesta muy rápida. En ocasiones la pregunta es tan vaga que dar una respuesta apropiada es simplemente imposible. La capacidad de establecer una estimación sensata es una habilidad muy útil que necesita de mucha práctica. El Ejemplo resuelto y las preguntas 2-5 que se proponen a continuación son ejemplos típicos de cálculos que no tienen una respuesta exacta.

Cuando se efectúan estimaciones, cada persona puede establecer una respuesta distinta, de manera que lo más apropiado es emplear una única cifra significativa (o dos como máximo). A veces solo es necesario dar un orden de magnitud.

Ejemplo resuelto

2 Estima la masa del aire de un aula (densidad del aire = 1,3 kg m^{-3})

Un aula convencional puede tener unas dimensiones de 7 m x 8 m x 3 m, de modo que su volumen es de unos 170 m^3

masa = densidad x volumen = 170 x 1,3 = 220 kg

Como se trata de una estimación, tal vez sería más apropiado dar una respuesta de 200 kg. En orden de magnitud correspondería a 10^2 kg

1 Estima la masa de:
- **a** una hoja de un libro
- **b** el aire que contiene una botella
- **c** un perro
- **d** el agua que contienen los océanos de la Tierra.

2 Proporciona una estimación para las preguntas siguientes:
- **a** la altura de un edificio de tres pisos
- **b** el número de veces que gira una rueda a lo largo de la vida útil de un coche
- **c** cuántos granos de área caben en una taza
- **d** el espesor de una hoja de un libro.

3 Estima los periodos de tiempo siguientes:
- **a** cuántos segundos contiene una vida humana media
- **b** cuánto tardaría una persona en dar una vuelta completa a la Tierra (ignora el tiempo durante el que no camina)
- **c** cuánto tarda la luz en atravesar una habitación.

4 Averigua los datos necesarios para poder comparar las medidas siguientes. (Da tu respuesta en forma de orden de magnitud).
- **a** la distancia a la Luna con respecto a la circunferencia de la Tierra
- **b** la masa de la Tierra con respecto a la masa de una manzana
- **c** el tiempo que tarda la luz en atravesar un metro con respecto al tiempo que transcurre entre tus latidos.

1.2 Incertidumbre y errores

El objetivo de los científicos es diseñar experimentos que puedan proporcionar un «valor exacto» de sus medidas, pero debido a la precisión limitada de los aparatos de medida, normalmente expresan los resultados con un determinado grado de incertidumbre

Naturaleza de la ciencia

Certidumbre

Aunque los científicos se distinguen por la búsqueda de las respuestas «exactas», toda medida contiene inevitablemente un grado de incertidumbre. Los resultados de *toda* investigación científica contienen incertidumbres y errores, aunque el objetivo de una investigación de calidad es minimizarlos tanto como sea posible.

Cuando recibimos datos numéricos de cualquier clase (ya sean científicos o de otro tipo), necesitamos saber hasta dónde podemos creernos la información que estamos leyendo o escuchando. La presentación de los resultados de una investigación científica rigurosa debe contener siempre una evaluación de la incertidumbre asociada a los resultados, ya que esta constituye parte integral del proceso científico. Desafortunadamente no ocurre lo mismo para mucha de la información que recibimos a través de los medios de comunicación, que suele presentarse demasiado a menudo de forma poco crítica y poco científica, sin referencias a las fuentes y a su fiabilidad.

Ya podemos intentarlo de todas las maneras, incluso con los mejores instrumentos de medida; simplemente no es posible medir algo. Y eso es por una razón: las cosas que queremos medir no existen como cantidades perfectamente exactas; de hecho, no hay ningún motivo para lo que lo sean.

En consecuencia, *toda* medida es una aproximación. Puede que una medida sea la más exacta que se haya hecho jamás; por ejemplo, puede establecerse que la anchura de una regla es 2,283 891 03 cm, pero todavía no es un valor perfecto, y si lo fuera, no lo sabríamos, porque siempre necesitaríamos un instrumento más preciso para comprobarlo. En este ejemplo tenemos, además, una complicación adicional: cuando medimos longitudes muy pequeñas, tenemos que lidiar con la naturaleza atómica de los objetos que estamos midiendo. (¿Cuál es el límite de un átomo?)

La **incertidumbre** es el intervalo, por encima y por debajo de un valor dado, en el que cabe esperar que se encuentren los valores de las medidas repetidas de un experimento. Por ejemplo, si la altura media que alcanza el rebote de una pelota cuando esta se lanza (desde una misma altura) es 48 cm y las medidas experimentales de dicho rebote se encuentran en el intervalo entre 45 cm y 51 cm, el resultado de la medida experimental del rebote debería expresarse como 48 ± 3 cm. La incertidumbre es ± 3 cm, aunque suele expresarse mejor en forma de porcentaje, en este ejemplo ± 6%. Obviamente, lo deseable es que los experimentos den resultados con baja incertidumbre, a este tipo de medidas se las denomina **precisas**. Pero, ¡a veces los resultados precisos son incorrectos!

Cuanto más precisa es una medida, mayor es el número de cifras significativas (dígitos) que pueden emplearse para representarla.

Si se conoce el valor correcto («verdadero») de una magnitud y la medida experimental que se obtiene no coincide con dicho valor, hablamos de **error** experimental. Es decir, se produce un error en una medida cuando su resultado no coincide con el valor correcto. Por ejemplo, si un alumno obtiene experimentalmente el valor 49 cm para la altura del rebote de una pelota, pero la observación de un registro de video muestra que el valor correcto es 48 cm, el error de la medida es de + 1 cm.

Todas las medidas comportan errores, ya sean grandes o pequeños, que obedecen a distintas causas, pero, en todo caso, no deben confundirse con las equivocaciones. Los errores pueden clasificarse como *aleatorios* o *sistemáticos* (ver más abajo), aunque, hasta cierto punto, todas las medidas llevan asociados errores de ambos tipos.

Los términos *error* e *incertidumbre* se utilizan con el mismo significado, aunque esta identificación solo tiene sentido cuando nos referimos a experimentos que tienen un resultado verdadero conocido.

Enlace con la teoría del conocimiento

El conocimiento científico es provisional

«Uno de los objetivos de las ciencias físicas es proporcionar un retrato exacto del mundo material. Uno de los logros de la física del siglo XX ha sido demostrar que este objetivo es inalcanzable».

Jacob Bronowski

¿Pueden los científicos estar verdaderamente seguros de sus descubrimientos?

La creencia popular es que la ciencia trabaja con «hechos» y, en gran parte, es así; pero esta creencia también proporciona una impresión incompleta de la naturaleza de la ciencia. La afirmación es engañosa, en tanto que puede sugerir que los científicos creen que han desvelado determinadas «verdades» universales para siempre. El conocimiento científico es provisional y está completamente abierto a los cambios a medida que se van realizando nuevos descubrimientos. Es más, esta es la naturaleza esencial de la ciencia, y los buenos científicos fomentan la revisión del «conocimiento» existente y la búsqueda del perfeccionamiento y el progreso.

Distintas clases de incertidumbre

La incertidumbre en las medidas experimentales que se trata en el presente capítulo es consecuencia de las limitaciones de los científicos y de sus equipos para obtener resultados 100% exactos. No obstante, debemos también tener en cuenta que el propio acto de medir puede cambiar lo que estamos intentando medir. Por ejemplo, el hecho de conectar un amperímetro a un circuito eléctrico puede tener un efecto sobre la intensidad de la corriente que se desea medir, por muchos esfuerzos que se realicen para minimizar dicho efecto. Análogamente, el hecho de poner un termómetro en un líquido caliente altera su temperatura.

La «incertidumbre» también aparece como un importante concepto en la física moderna: el principio de incertidumbre de Heisenberg trata del comportamiento de las partículas subatómicas y se explica en el capítulo 12 (alumnos de Nivel Avanzado). Una de sus ideas centrales es que cuanta mayor es la precisión con la que se conoce la posición de una partícula, menor es la precisión con la que se conoce su momento, y viceversa. Sin embargo, hay que recalcar que el principio de incertidumbre de Heisenberg es una característica fundamental de la física cuántica y que no tiene nada que ver con los límites experimentales de la tecnología de laboratorio actual.

Errores aleatorios y sistemáticos

Errores aleatorios

Los **errores aleatorios** son inevitables, porque las medidas exactas son imposibles. Los valores obtenidos experimentalmente pueden ser mayores o menores que el valor correcto y se distribuyen de forma aleatoria a su alrededor.

Por regla general, los errores aleatorios son desconocidos e impredecibles. Su existencia se debe a múltiples razones, entre las que se encuentran:

- limitaciones de la escala o la pantalla que se esté utilizando
- lecturas de la escala desde posiciones incorrectas
- irregularidad en los tiempos de reacción de la persona que manipula un cronómetro
- dificultad para realizar observaciones que cambian rápidamente con el tiempo.

La lectura obtenida a partir de un instrumento de medida está limitada por la menor división de su escala. Es lo que se denomina **error de legibilidad** (o **de lectura**). Por ejemplo, un termómetro de vidrio con un líquido en su interior, con una escala en la que solo vienen marcados los grados (23 °C, 24 °C, 25 °C, etc.) no es fiable para medir intervalos de temperatura de 0,1 °C. Normalmente se considera que el error asociado a una escala **analógica** (continua), como la del termómetro de vidrio del ejemplo anterior, es la mitad de la división más pequeña, para este ejemplo ± 0,5 °C. En el caso de instrumentos **digitales** se considera que el error corresponde a la menor división que puede mostrar en pantalla el instrumento de medida. En la Figura 1.2 se muestran dos amperímetros, uno analógico y el otro digital, que pueden utilizarse para medir la intensidad de la corriente eléctrica.

Un motivo muy habitual por el que aparecen errores aleatorios es la lectura de una escala analógica desde una posición incorrecta. Se denomina **error de paralaje** y en la Figura 1.3 se muestra un ejemplo de este tipo de error.

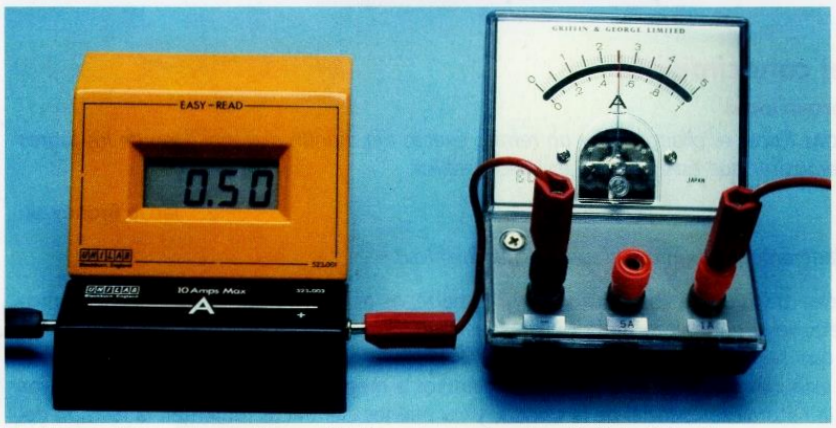


Figura 1.2 *Amperímetro analógico y amperímetro digital utilizados para medir la misma intensidad de corriente eléctrica*

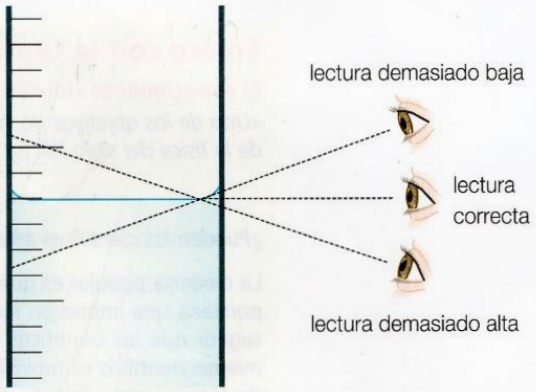


Figura 1.3 *Error de paralaje cuando se lee el nivel de líquido en un cilindro de medida*

Errores sistemáticos

Un **error sistemático** se produce cuando algo funciona mal de *manera repetida*, ya sea en el instrumento de medida o en el método empleado. Una lectura que presenta un error sistemático siempre es o más alta o más baja que el valor correcto y siempre en la misma cantidad. Las causas más frecuentes de estos errores son instrumentos que tienen una escala incorrecta (mal **calibrada**), o instrumentos que tienen un valor inicial incorrecto, como por ejemplo un medidor que muestra en pantalla un determinado valor cuando la lectura debería ser cero. Este error se denomina **error de calibración de cero**, del que se muestra un ejemplo en la Figura 1.4. Un termómetro que registra de forma incorrecta la temperatura de una habitación produce errores sistemáticos cuando se utiliza para medir otras temperaturas.



Figura 1.4 *Este voltímetro tiene un error de calibración de cero de 0,3 V, por tanto todas las lecturas se verán incrementadas por igual en 0,3 V*

Exactitud

Se dice que una medida cercana al valor correcto (si este se conoce) es una medida **exacta**, pero, en el lenguaje científico, el término *exacto* también significa que un conjunto de medidas realizadas durante un experimento posee un pequeño error sistemático. Por tanto, un conjunto de medidas exactas se distribuye de forma prácticamente uniforme alrededor del valor correcto

(ya sea cerca o lejos de este), de manera que el promedio de estas medidas estará cerca del valor verdadero.

En muchos experimentos puede suceder que se desconozca el valor «correcto», lo que comporta que la exactitud de las medidas no se puede conocer con certeza. En estos casos, la calidad de la medida se puede juzgar mejor mediante su **precisión**: ¿pueden repetirse los mismos resultados?

Las diferencias entre precisión y exactitud pueden ilustrarse mediante el ejemplo de unas flechas y una diana, como en la Figura 1.5. El tiro es preciso si las flechas están agrupadas muy cerca unas de otras, y exacto si las flechas se distribuyen de forma prácticamente uniforme alrededor del centro de la diana. El último diagrama representa *tanto* exactitud *como* precisión, aunque en el lenguaje cotidiano hablaríamos simplemente de precisión.

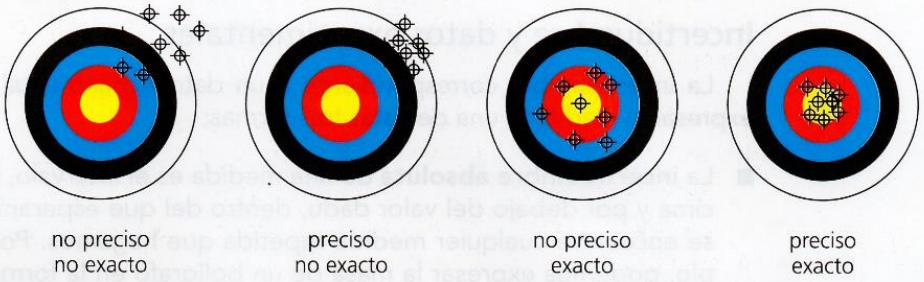


Figura 1.5 *Diferencia entre precisión y exactitud*

Un reloj que siempre se adelanta 5 minutos se puede decir que es preciso, pero no es exacto. Es un claro ejemplo de error de calibración de cero sistemático. El uso de un cronómetro manual para cronometrar una carrera de 100 m puede proporcionar resultados exactos (si no hay errores sistemáticos), pero es poco probable que sea preciso, porque los tiempos de reacción humanos dan lugar a errores aleatorios significativos.

Identificación y reducción de los efectos de los errores

Si disponemos de una única medida de una determinada magnitud, puede que no tengamos manera de saber lo cerca que está del resultado correcto; es decir, probablemente desconocemos la magnitud de cualquier error de la medida. Pero si repetimos la medida y los resultados son similares (baja incertidumbre, alta precisión) aumenta nuestra confianza en los resultados del experimento, sobre todo si hemos revisado cualquier causa posible de error sistemático.

La manera más habitual de reducir los efectos de los *errores aleatorios* es mediante la repetición de experimentos y el cálculo del promedio de los resultados, que debería estar más cerca del valor correcto que la mayoría, o la totalidad, de las medidas individuales. Cualquier valor inusual (**anómalo**) debe ser verificado y probablemente excluido del cálculo del promedio.

Muchos experimentos implican la realización de un intervalo de medidas, cada una bajo unas condiciones experimentales distintas, de forma que se pueda representar una gráfica que muestre el patrón de resultados. (Por ejemplo, cambiando el voltaje de un circuito eléctrico para ver cómo afecta a la intensidad de corriente eléctrica). Si aumentamos el número de pares de medidas reducimos también los efectos de los errores aleatorios porque la recta de ajuste puede dibujarse con mayor fiabilidad.

Los experimentos deben diseñarse, dentro de lo posible, para que produzcan lecturas grandes. Por ejemplo, podemos leer las divisiones de una regla hasta la mitad de un milímetro, y otro tanto les ocurre a las medidas que realicemos con este instrumento. Cuando medimos una longitud de 90 cm probablemente este error se puede considerar aceptable (es un porcentaje de error del 0,56%), pero este mismo porcentaje de error cuando medimos solo 2 mm es probablemente inaceptable. Cuanto más grande es la lectura de una medida (realizada con un determinado instrumento), menor será su error asociado. Si esto no es posible, puede que sea necesario sustituir el instrumento de medida por otro con divisiones más pequeñas.

Puede ocurrir que llevemos a cabo un experimento cuidadosamente y con instrumentos de buena calidad y, en cambio, tengamos errores aleatorios importantes. Las causas pueden ser diversas y es posible que tengamos que rediseñar el experimento para soslayar los problemas. El uso de un cronómetro para medir el tiempo que tarda en llegar al suelo un objeto que dejamos caer o la medida de la altura del rebote de una pelota son dos ejemplos de experimentos simples que pueden dar lugar a errores aleatorios significativos.

Los efectos de los *errores sistemáticos* no pueden reducirse repitiendo las medidas. Los instrumentos deben revisarse antes de ser utilizados para detectar posibles errores, pero puede ocurrir que no detectemos un error sistemático hasta que hayamos representado gráficamente los resultados y veamos que la recta de ajuste no interseca el eje vertical de la forma esperada, como se muestra en la Figura 1.6. En un caso así lo más conveniente es aumentar o disminuir todas las medidas una misma magnitud si es que se puede determinar la causa del error sistemático.

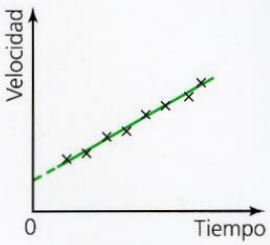


Figura 1.6 *La recta de ajuste para esta gráfica velocidad-tiempo, correspondiente a un carrito que cae rodando por una pendiente desde una posición de reposo, no pasa por el origen, por tanto ha habido probablemente un error sistemático*

Incertidumbre absoluta, relativa y en porcentaje

Incertidumbre y datos experimentales

La incertidumbre correspondiente a un dato experimental puede expresarse mediante una de estas tres formas:

- La **incertidumbre absoluta** de una medida es el intervalo, por encima y por debajo del valor dado, dentro del que esperamos que se encuentre cualquier medida repetida que hagamos. Por ejemplo, podemos expresar la masa de un bolígrafo en la forma 53,2 g ± 0,1 g, donde la incertidumbre es ± 0,1 g.
- La **incertidumbre relativa** es el cociente entre la incertidumbre absoluta y el valor medido.
- El **porcentaje de incertidumbre** es la incertidumbre relativa expresada en porcentaje.

La incertidumbre expresada en porcentaje suele ser la que proporciona mayor información. Lo deseable es que un experimento produzca resultados con incertidumbre menor del 5%, pero no siempre es posible.

Ejemplo resuelto

3 La masa de una pieza de metal se expresa en la forma 346 g ± 2,0%.
a ¿Cuál es la incertidumbre absoluta?
b ¿Cuál es el rango de valores esperado que puede tomar la masa?
c ¿Cuál es la incertidumbre relativa?

a el 2% de 346 g es ± 7 g (aproximando a gramos, como el dato inicial)

b entre 339 g y 353 g (con 3 cifras significativas)

c el 2% equivale a $\frac{1}{50}$

Lo ideal sería expresar todas las medidas experimentales con la incertidumbre asociada, pero puede resultar repetitivo y tedioso en un contexto de aprendizaje, de modo que se suelen omitir hasta que se trabaja con este tema de forma específica.

Normalmente es fácil decidir el valor de la incertidumbre asociada a una medida aislada realizada con un determinado instrumento. Se suele identificar esta incertidumbre con el error de lectura, tal como hemos descrito anteriormente. Sin embargo, a veces es difícil decidir cuál es la incertidumbre global asociada a una medida teniendo en cuenta todas las dificultades experimentales. Por ejemplo, el error de lectura de un cronómetro puede ser 0,01 s, pero la incertidumbre asociada a sus medidas puede ser mucho mayor como consecuencia de los tiempos de reacción humanos.

La mayor o menor dispersión de las lecturas alrededor del valor medio puede ser útil como guía para estimar la incertidumbre aleatoria, pero no así para la incertidumbre sistemática. Una vez calculado el valor medio de las lecturas, puede establecerse que la incertidumbre aleatoria es la máxima diferencia entre una lectura aislada y el valor medio. Esto último se ilustra en el ejemplo resuelto siguiente.

Ejemplo resuelto

4 Las medidas siguientes (en cm) corresponden a las lecturas de un experimento para medir la altura del rebote de una pelota: 32, 29, 33, 32, 37 y 28. Estima los valores de la incertidumbre aleatoria (absoluta y en porcentaje) asociados al experimento.

La media aritmética de estas seis lecturas es 31,83 cm, pero sería más adecuado expresarla con dos cifras significativas (32 cm), como los datos originales. La lectura que presenta la mayor diferencia con este valor medio es 37 cm, por tanto 5 cm es una posible estimación de la incertidumbre absoluta; en porcentaje, la incertidumbre es: (5/37) x 100 = 14%.

Fíjate en que si los mismos datos se hubieran obtenido en el orden: 28, 29, 32, 32, 33, 37, sería difícil de creer que las incertidumbres fueran aleatorias y sería necesario encontrar otra explicación para la variación de resultados.

Incertidumbre en resultados calculados

Cuando efectuamos cálculos basados en datos experimentales, se supone que conocemos la incertidumbre asociada a cada medida individual. Por tanto, es importante saber cómo utilizar estas incertidumbres individuales para determinar la incertidumbre de cualquier resultado calculado a partir de estos datos.

Consideremos un ejemplo simple: medimos la distancia recorrida por un carrito que se desplaza a velocidad constante, 76 cm ± 2 cm (± 2,6%) durante un tiempo de 4,3 s ± 0,2 s (± 4,7%).

Podemos calcular la velocidad a partir del cociente distancia/tiempo = 76/4,3 = 17,67..., que se expresa como 18 m s^{-1} cuando lo redondeamos a dos cifras significativas, por consistencia con los datos experimentales.

Para determinar la incertidumbre de este resultado, consideramos las incertidumbres asociadas a la distancia y al tiempo. Si utilizamos la distancia más larga y el tiempo más corto, la mayor respuesta posible para la velocidad es 78/4,1 = 19,02... Si utilizamos la menor distancia y el tiempo más largo, la menor respuesta posible para la velocidad es 74/4,5 = 16,44... (Los números los redondearemos al final de los cálculos).

La velocidad se encuentra, por tanto, entre 16,44 cm s^{-1} y 19,02 cm s^{-1}. El valor 19,02 presenta la mayor diferencia (1,35) respecto a 17,67. Así pues, el resultado final puede expresarse como 17,67 ± 1,35 cm s^{-1}, que representa una incertidumbre máxima del 7,6%. Si redondeamos a dos cifras significativas, el resultado pasa a ser 18 ± 1 cm s^{-1}.

Los cálculos de la incertidumbre según el método anterior pueden llegar a ser muy farragosos, de modo que, en este curso, *se aceptarán los métodos aproximados*. Por ejemplo, en el cálculo de la velocidad que acabamos de realizar, la incertidumbre de los datos fue del ± 2,6% para la distancia y del ± 4,7% para el tiempo. El porcentaje de incertidumbre del resultado final se puede aproximar mediante la suma de los porcentajes de incertidumbre de los datos de partida: 2,6 + 4,7 = 7,3%. Con este método aproximado obtenemos más o menos el mismo valor que el que habíamos calculado utilizando los valores mayores y menores posibles de la velocidad. A continuación se dan algunas reglas para estimar la incertidumbre en el caso de resultados calculados.

Reglas para estimar la incertidumbre en resultados calculados

- Para cantidades que proceden de adición o substracción: sumar las incertidumbres absolutas. En el *Apéndice de datos de Física* esto se expresa como:

Si $y = a \pm b$ entonces $\Delta y = \Delta a + \Delta b$

- Para cantidades que proceden de multiplicación o de división: sumar las incertidumbres relativas individuales o los porcentajes de incertidumbre individuales. En el *Apéndice de datos de Física* esto se expresa como:

Si $y = \frac{ab}{c}$ entonces $\frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta c}{c}$

- Para cantidades que proceden de elevar a una potencia, *n*, el *Apéndice de datos de Física* da:

Si $y = a^n$ entonces $\frac{\Delta y}{y} = \ln\left(\frac{\Delta a}{a}\right)$

- Para otras funciones (como las trigonométricas, logarítmicas o raíces cuadradas): calcular los valores absolutos mayores y menores posibles y comparar con el valor medio, tal como se muestra a continuación en el ejemplo resuelto. Ten en cuenta, no obstante, que aunque estos cálculos puedan tener lugar en conexión con el trabajo de laboratorio, *no* se pedirán en los exámenes.

Ejemplo resuelto

5 La medida de un ángulo θ, resulta ser 34° ± 1°. ¿Cuál es la incertidumbre asociada a la inclinación de este ángulo?

tg 34° = 0,675 tg 33° = 0,649 tg 35° = 0,700

Mayor incertidumbre absoluta = 0,675 – 0,649 = 0,026
(0,700 – 0,675 = 0,025, que es menor que 0,026)

Por tanto, tg θ = 0,67 ± 0,03 (utilizando el mismo número de cifras significativas que en los datos originales).

5 Se añade una masa de 346 ± 2 g a una masa de 129 ± 1 g.
- **a** ¿Cuál es la incertidumbre absoluta global?
- **b** ¿Cuál es el porcentaje de incertidumbre global?

6 La ecuación $s = \frac{1}{2}at^2$ se emplea para calcular el valor de s cuando a es 4,3 ± 0,2 m s^{-2} y t es 1,4 ± 0,1 s.
- **a** Calcula el valor de s.
- **b** Calcula el porcentaje de incertidumbre de los datos del enunciado.
- **c** Calcula el porcentaje de incertidumbre de la respuesta.
- **d** Calcula la incertidumbre absoluta de la respuesta.

7 La medida de una cierta magnitud resulta ser (1,46 ± 0,08). ¿Cuál es la máxima incertidumbre de la raíz cuadrada de esta magnitud?

Uso de las hojas de cálculo para calcular incertidumbres

Las hojas de cálculo pueden resultar muy útiles cuando hay que efectuar múltiples cálculos de incertidumbres asociadas a resultados experimentales. Por ejemplo, la resistividad, ρ, de un alambre puede calcularse mediante la ecuación $\rho = R\pi r^2/l$, donde r y l son el radio y la longitud del alambre, respectivamente, y R es su resistencia. En la figura 1.7 se muestran los **datos sin procesar** (sombreados en verde) de un experimento en el que se mide la resistencia de varios alambres de un mismo metal. En el resto de la hoja de cálculo se muestran los cálculos correspondientes al proceso de datos para determinar la resistividad y la incertidumbre en el resultado. Se puede utilizar un programa de ordenador para dibujar una gráfica de los resultados, que además puede incluir barras de error (véase página 13).

RESISTENCIA		RADIO			LONGITUD		RESISTIVIDAD		
Resistencia R/Ω ± 0,2 Ω	Porcentaje de incertidumbre en R	Radio, r/mm ± 0,01 mm	Porcentaje de incertidumbre en r	Porcentaje de incertidumbre en r^2	Longitud, l/cm ± 1 cm	Porcentaje de incertidumbre en l	Resistividad, $\rho = R\pi r^2/l/\Omega$m	Porcentaje de incertidumbre en ρ	Incertidumbre absoluta en ρ/Ωm
9,4	2,1	0,15	6,7	13,3	44	2,3	0,0000015	18	0,0000003
6,2	3,2	0,22	4,5	9,1	67	1,5	0,0000014	14	0,0000002
6,2	3,2	0,25	4,0	8,0	80	1,3	0,0000015	12	0,0000002
5,2	3,8	0,30	3,3	6,7	99	1,0	0,0000015	12	0,0000002
5,0	4,0	0,35	2,9	5,7	128	0,8	0,0000015	10	0,0000002
3,8	5,3	0,43	2,3	4,7	149	0,7	0,0000015	11	0,0000002
3,4	5,9	0,51	2,0	3,9	175	0,6	0,0000016	10	0,0000002
2,4	8,3	0,62	1,6	3,2	198	0,5	0,0000015	12	0,0000002

Figura 1.7 *Uso de una hoja de cálculo para calcular indeterminaciones asociadas a un experimento de resistencia eléctrica*

8
- **a** Utiliza una hoja de cálculo para entrar los mismos datos sin procesar que se muestran en la Figura 1.7.
- **b** Utiliza la hoja de cálculo para confirmar los cálculos que se muestran.
- **c** ¿Qué diferencia aparecería en los resultados si el radio del alambre solo se pudiera medir con una precisión de medio milímetro?

Naturaleza de la ciencia

Incertidumbre

«Todo conocimiento científico presenta un cierto grado de incertidumbre...»

Richard P. Feynman (1998), *¿Qué significa todo eso?: Reflexiones de un científico-ciudadano*

No solo son los experimentos los que presentan incertidumbre. Todo conocimiento científico la posee en un determinado grado, en el sentido de que los buenos científicos comprenden que aquello que damos por cierto hoy puede cambiar a la luz de nuevos descubrimientos o perspectivas. Y esta duda es fundamental para la verdadera naturaleza de la ciencia. En cualquier época, pasada o presente, el desarrollo de la ciencia se ha sustentado sobre un corpus de conocimiento consensuado por la comunidad científica, y los mayores avances provienen justamente de aquellos que cuestionan y ponen en duda la situación actual del conocimiento y el pensamiento científico.

Representación gráfica de la incertidumbre

Los sistemas de representación gráfica se explican detalladamente en el apartado *Gráficos y análisis de datos* de la página web gratuita anexa.

El intervalo de incertidumbre aleatoria de una medida o de un resultado calculado puede representarse gráficamente mediante unas cruces que representan cada dato experimental o calculado (en lugar de un punto).

Barras de error

En la Figura 1.8 se muestra un ejemplo, la gráfica de la distancia en función del tiempo para el movimiento de un tren. Sobre cada dato se dibuja una línea vertical y otra horizontal que representan la incertidumbre en las medidas de ambos ejes, respectivamente. En este ejemplo concreto, la incertidumbre en el tiempo es ± 0,5 s y la incertidumbre en la distancia es ± 1 m. Estas líneas, que normalmente se representan con una pequeña línea perpendicular en el extremo, para indicarlo claramente, se denominan **barras de error** (tal vez sería mejor denominarlas barras de *incertidumbre*). En la Figura 1.8, el área delimitada por cada barra de error se ha sombreado para destacarla. Cabe esperar que la curva de ajuste pase por alguno de los puntos de cada una de las áreas sombreadas.

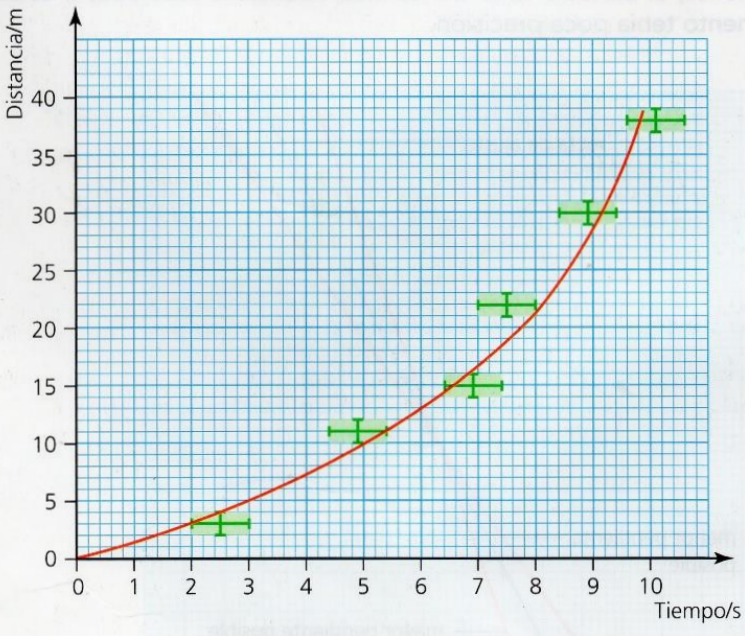


Figura 1.8 *Representación de la incertidumbre mediante barras de error*

En algunos experimentos, las barras de error son tan cortas e insignificantes que no se incluyen en la gráfica. Por ejemplo, la medida de una masa puede expresarse como 347,46 ± 0,01 g. La incertidumbre asociada a esta lectura sería demasiado pequeña para representarla en forma de barra de error sobre un gráfico. (Fíjate en que no cabe esperar barras de error para las funciones trigonométricas y logarítmicas).

Incertidumbre asociada a la pendiente y a las intersecciones con los ejes

Si los resultados de un experimento sugieren una representación lineal, normalmente es importante determinar los valores de la pendiente y/o las intersecciones con los ejes. Sin embargo, a menudo se pueden dibujar diversas rectas que pasan por las barras de error que representan los datos experimentales.

Generalmente consideramos que la recta de ajuste está entre la recta de máxima pendiente posible y la recta de mínima pendiente posible. En la Figura 1.9 se muestra un ejemplo (por simplicidad, solo se representan la primera y la última barra de error, pero en la práctica deben considerarse todas las barras de error para dibujar las rectas).

En la Figura 1.9 se representa la variación de la longitud de un muelle metálico en función de la fuerza con la que se estira. Sabemos que las medidas no son precisas porque las barras de error son largas. La recta de ajuste se ha dibujado entre las otras dos rectas. Se trata de un **gráfico lineal** (una línea recta) y sabemos que la pendiente de la recta representa la fuerza constante (rigidez) del muelle, y la intersección con el eje x representa la longitud original del muelle. A partir de las medidas procedentes de la recta de ajuste, podemos efectuar los cálculos siguientes:

$$\text{fuerza constante= gradiente} = \frac{90 - 0}{6{,}6 - 1{,}9} = 19\,\text{N}\,\text{cm}^{-1}$$

longitud original = intersección con el eje x = 1,9 cm

Para determinar la incertidumbre en el cálculo de la pendiente y de las intersecciones con los ejes, debemos considerar el conjunto de rectas que atraviesan las barras de error. La incertidumbre será la máxima diferencia entre los valores obtenidos a partir de las gráficas con la mayor pendiente posible y la menor pendiente posible, respectivamente, y el valor calculado a partir de la recta de ajuste. En este ejemplo se haría de la forma siguiente:

la fuerza constante está entre $14\,\text{N}\,\text{cm}^{-1}$ y $28\,\text{N}\,\text{cm}^{-1}$

la longitud original está entre 1,1 cm y 2,6 cm.

El resultado final se puede representar como:

fuerza constante = $19 \pm 9\,\text{N}\,\text{cm}^{-1}$

longitud original = $1{,}9 \pm 0{,}8$ cm.

Claramente, el elevado valor de las incertidumbres asociadas a estos resultados confirma que el experimento tenía poca precisión.

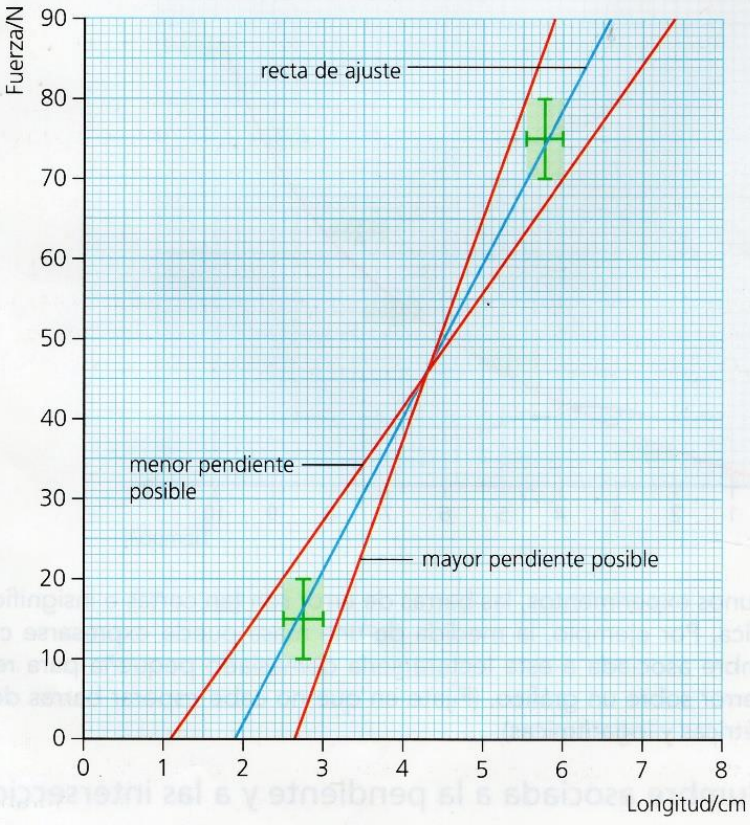


Figura 1.9 *Búsqueda de las pendientes máxima y mínima en el experimento del estiramiento de un muelle*

1.3 Magnitudes vectoriales y escalares

Algunas magnitudes poseen dirección y módulo, mientras que otras solo poseen módulo; comprenderlo es fundamental para su correcta manipulación

Naturaleza de la ciencia

Modelos tridimensionales

Al estudiar las páginas de un libro o una pantalla, es fácil que perdamos la conciencia espacial y el reconocimiento de que los principios de la ciencia se aplican al espacio tridimensional. Es importante conocer las direcciones de algunas magnitudes físicas (en dos o en tres dimensiones) para comprender sus efectos. Estas magnitudes se denominan vectores. El tratamiento matemático de las magnitudes vectoriales en tres dimensiones (análisis vectorial) se inició en el siglo dieciocho.

Magnitudes vectoriales y escalares

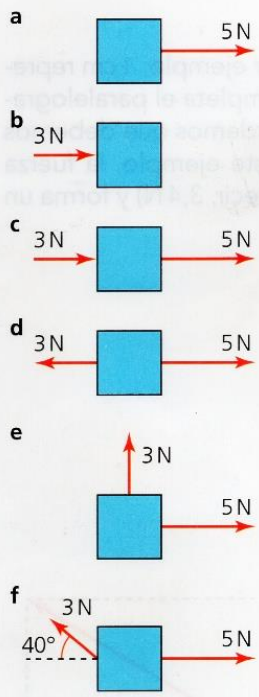


Figura 1.10
Las fuerzas son magnitudes vectoriales

En los diagramas de la Figura 1.10 se representa la fuerza o fuerzas que actúan sobre un objeto. En la Figura 1.10a el objeto está siendo estirado hacia la derecha con una fuerza de 5 N. La longitud de la flecha representa su tamaño, y la orientación de la flecha representa la dirección en la que actúa. La longitud de la flecha es proporcional a la fuerza. En la Figura 1.10b se representa una fuerza más pequeña (3 N) que empuja el objeto hacia la derecha. En ambos ejemplos el objeto se desplazará (se acelerará) hacia la derecha.

En la Figura 1.10c hay dos fuerzas actuando. Podemos sumarlas para mostrar que el efecto es el mismo que el que correspondería a una única fuerza de 8 N (= 3 + 5) actuando sobre el objeto. Decimos entonces que la fuerza *resultante* (neta) es de 8 N.

En la Figura 1.10d hay dos fuerzas actuando sobre el objeto, pero lo hacen en direcciones distintas. El efecto global lo podemos calcular «sumando» las dos fuerzas, pero en este caso debemos tener en cuenta su dirección. Así, podemos escribir +5 + (–3) = + 2 N, donde a las fuerzas que tiran hacia la derecha les otorgamos signo positivo y a las que lo hacen hacia la izquierda, negativo. La resultante tiene el mismo efecto que una única fuerza (2 N) tirando hacia la derecha. En las Figuras 1.10e y 1.10f también hay dos fuerzas actuando, pero no lo hacen sobre la misma recta. En estos casos, la resultante puede determinarse mediante un compás o mediante cálculos trigonométricos (véase página 16).

Así, una fuerza es una magnitud de la que necesitamos conocer su *dirección* y su *módulo* (tamaño).

Las magnitudes que poseen tanto módulo como dirección se denominan **vectoriales**.

Todo lo que medimos posee un módulo y una unidad. Por ejemplo, podemos medir la masa de un libro, que resulta ser 640 g. Aquí, 640 g es el módulo de la medida, pero la masa no tiene dirección.

Las magnitudes que solo poseen módulo, pero no así dirección, se denominan **escalares.**

La mayoría de las magnitudes son escalares. Algunos ejemplos habituales de magnitudes escalares utilizados en física son la masa, la longitud, el tiempo, la energía, la temperatura y la velocidad. Sin embargo, cuando utilizamos las magnitudes siguientes necesitamos conocer tanto el módulo como la dirección sobre la que están actuando, ya que son *magnitudes vectoriales:*

- desplazamiento (distancia en una dirección dada)
- velocidad (rapidez en una dirección dada)
- fuerza (incluyendo el peso)
- aceleración
- momento e impulso
- intensidad del campo (gravitatorio, eléctrico y magnético).

Los símbolos de las magnitudes vectoriales se suelen representar con letra cursiva y en negrita (por ejemplo ***F***). Para las magnitudes escalares se suele emplear la cursiva normal (por ejemplo, *m*).

En los diagramas, todos los vectores se representan con flechas que apuntan hacia el sentido correcto y con una longitud que es proporcional al módulo del vector (como en las fuerzas de la Figura 1.11). A lo largo de este curso los cálculos vectoriales se limitarán a dos dimensiones.

La importancia de los vectores puede ilustrarse mediante la diferencia entre distancia y desplazamiento. El piloto de un vuelo internacional que conecta Estambul con El Cairo, por poner un ejemplo, necesita saber algo más aparte de que ambas ciudades están separadas por 1 234 km. El piloto necesita conocer el «rumbo» (la dirección) de vuelo para llegar al destino.

Análogamente, en estudios topográficos o de agrimensura deben medirse *tanto* la distancia *como* la dirección de una determinada posición respecto a un punto de referencia.

Combinación y descomposición de vectores

Suma de vectores para determinar el vector resultante

Cuando sumamos dos o más magnitudes escalares (por ejemplo, una masa de 25 g con otra de 50 g), hay una única respuesta posible (resultante): 75 g. Pero, cuando sumamos cantidades vectoriales, existe una gama de resultantes posibles, dependiendo de las direcciones con las que se trabaje.

Para determinar la resultante de las dos fuerzas que se representan en las Figuras 1.10e o 1.10f existen dos métodos posibles: el dibujo (método gráfico) o la trigonometría (método trigonométrico).

Método gráfico

Las dos fuerzas de la Figura 1.10f se dibujan cuidadosamente a escala (por ejemplo, 1 cm representando 1 N) respetando el ángulo que forman (140°). A continuación se completa el paralelogramo. La resultante es la diagonal del paralelogramo (véase Figura 1.11). Recordemos que debemos determinar tanto el módulo como la dirección a partir del diagrama. En este ejemplo, la fuerza resultante se representa mediante la línea roja. Su longitud es de 3,4 cm (es decir, 3,4 N) y forma un ángulo de 36° respecto a la fuerza de 5,0 N.

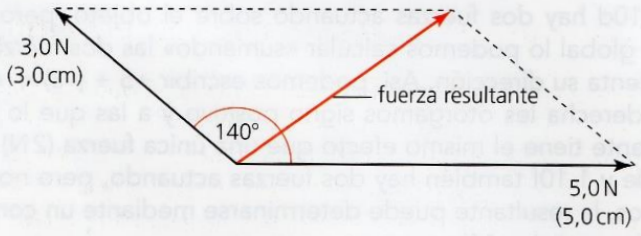


Figura 1.11
Uso del paralelogramo para la determinación de la fuerza resultante

Método trigonométrico

Las fuerzas de la Figura 1.11 forman un ángulo recto. Esto significa que el paralelogramo obtenido será un rectángulo (Figura 1.12) y el módulo de la resultante de las fuerzas, F, se puede calcular mediante el teorema de Pitágoras:

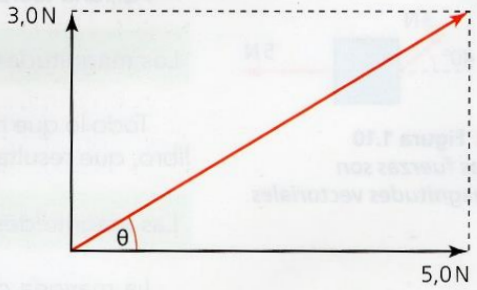


Figura 1.12

$$F^2 = 3{,}0^2 + 5{,}0^2 = 3$$

$$F = 5{,}8\,\text{N}$$

La dirección de esta fuerza puede determinarse mediante el uso de la trigonometría:

$$\text{tg}\,\theta = \frac{3{,}0}{5{,}0}$$ (θ es el ángulo que forma la resultante con la dirección de la fuerza de 5,0 N)

$$\theta = 31°$$

En este curso *no* se espera que determines las soluciones trigonométricas si el paralelogramo no es un rectángulo.

Resta de vectores para determinar su diferencia

Cuando deseamos conocer cuánto ha cambiado una magnitud vectorial, puede que tengamos que calcular la diferencia entre dos vectores. Dicha diferencia se determina *restando* un vector del otro. Un vector negativo posee el mismo módulo y dirección que el vector positivo, pero sentido contrario. Así, cuando restamos los vectores $\boldsymbol{P}$ y $\boldsymbol{Q}$ podemos escribir:

$$\boldsymbol{P} - \boldsymbol{Q} = \boldsymbol{P} + (-\boldsymbol{Q})$$

En la Figura 1.13 se representa una resta de vectores mediante el método gráfico. La línea roja representa la diferencia cuando un determinado vector cambia en magnitud y dirección de ***P*** a ***Q***.

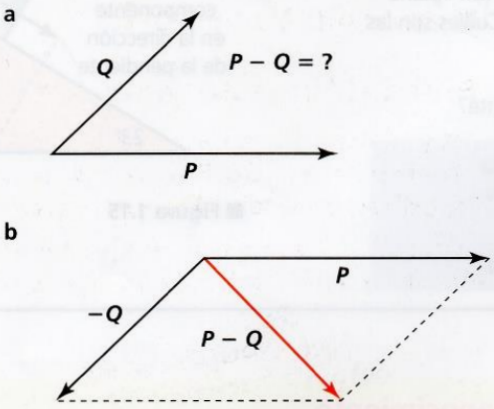


Figura 1.13 *Si deseamos calcular la diferencia entre **P** y **Q** (diagrama **a**) sumamos **P** y −**Q** (diagrama **b**)*

Multiplicación y división de vectores por escalares

Si un vector ***P*** se multiplica o se divide por un número escalar *k*, los vectores resultantes son simplemente *k**P*** o ***P***/*k*. Si *k* es negativo, el vector resultante se convierte en negativo, lo que significa que cambia de sentido respecto al vector ***P***.

Descomposición de un vector en dos componentes

Hemos visto anteriormente que dos vectores individuales pueden combinarse matemáticamente para encontrar un solo vector resultante que tenga el mismo efecto que los dos vectores considerados por separado. Este proceso puede hacerse al revés: puede considerarse que un vector individual tiene el mismo efecto que dos vectores por separado. A este proceso se le denomina **descomposición** de un vector en sus dos **componentes**. Descomponer puede ser muy útil porque, si las dos componentes se escogen de modo que sean perpendiculares entre sí (normalmente horizontal y vertical), serán independientes una de la otra y se podrán considerar totalmente por separado.

En la Figura 1.14 se representa un vector individual, ***A***, con la horizontal. Si queremos conocer el efecto de este vector sobre las dos direcciones, horizontal y vertical, podemos descomponerlo en sus dos componentes:

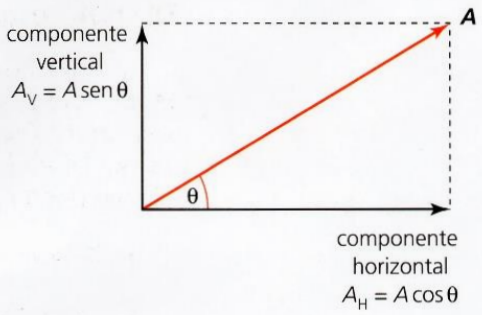


Figura 1.14 *Descomposición de un vector en dos componentes perpendiculares*

$$\cos \theta = \frac{A_H}{A}$$

y

$$\operatorname{sen} \theta = \frac{A_V}{A}$$

de forma que

$$A_H = A \cos \theta$$

y

$$A_V = A \operatorname{sen} \theta$$

Ambas ecuaciones y el diagrama asociado figuran en el *Apéndice de datos de Física*.

Ejemplo resuelto

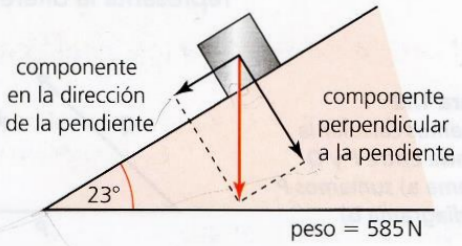
6 En la Figura 1.15 se representa una caja situada sobre una superficie en pendiente (un «plano inclinado»). La caja pesa 585 N. ¿Cuáles son las componentes del peso:

a en la dirección de la pendiente?

b perpendicularmente a la pendiente?

a componente en la dirección de la pendiente = $585 \operatorname{sen} 23° = 230\,N$

b componente perpendicular a la pendiente = $585 \cos 23° = 540\,N$



■ **Figura 1.15**

Enlace con la teoría del conocimiento

Física y matemáticas

¿Cuál es la naturaleza de la certidumbre y la demostración en matemáticas?

La ciencia se basa principalmente en el conocimiento obtenido a partir de la experimentación y la medida, aunque en este capítulo ha quedado claro que hablar de exactitud y certidumbre absolutas en la recogida de datos no es posible. Por el contrario, las teorías y métodos esenciales de las matemáticas puras lidian con la certidumbre. Las matemáticas son una herramienta indispensable para la física por muchas razones, entre las cuales figuran la concisión, la falta de ambigüedad y la utilidad para el establecimiento de predicciones. Los principios físicos más importantes pueden resumirse en forma matemática.

Selección de preguntas de examen

Hoja 1 preguntas del IB y preguntas tipo IB

1 Se ha medido en tres ocasiones el diámetro de un alambre con un instrumento que tiene un error de compensación de cero. Los resultados han sido respectivamente: 1,24 mm; 1,26 mm y 1,25 mm. El valor medio de estos resultados es:

A. exacto pero no preciso
B. preciso pero no exacto
C. exacto y preciso
D. inexacto e impreciso.

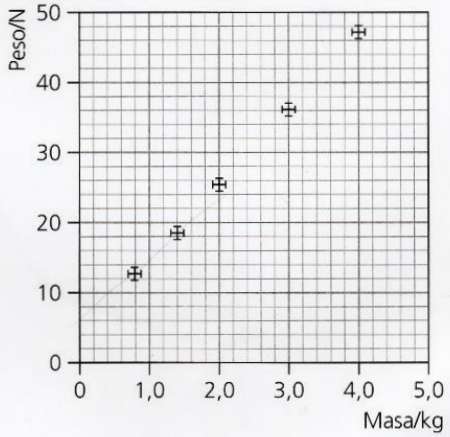
2 El espesor aproximado de una hoja de un libro de texto es:

A. 0,02 mm
B. 0,08 mm
C. 0,30 mm
D. 1,00 mm.

3 ¿Cuál de las respuestas siguientes representa la conversión aproximada de un periodo de tiempo de 1 mes a las unidades del SI?

A. 0,08 años
B. 30 días
C. 3×10^6 segundos
D. todas las anteriores.

4 Se miden de forma independiente las masas y los pesos de diferentes objetos. En el gráfico siguiente se representa el peso en función de la masa y se incluyen las barras de error.



Los resultados experimentales sugieren que:

A. las medidas muestran un error sistemático significativo y un error aleatorio pequeño
B. las medidas muestran un error aleatorio y un error sistemático pequeño
C. las medidas son precisas pero no exactas
D. el peso de un objeto es proporcional a su masa.

5 ¿Cuál de las unidades siguientes es una unidad del SI?

A. newton
B. culombio
C. amperio
D. joule

6 Se mide la distancia recorrida por un coche en un determinado periodo de tiempo con una incertidumbre del 6%. Si la incertidumbre en la medida del tiempo es del 2%, ¿cuál es la incertidumbre en el cálculo de la velocidad del coche?

A. 3%
B. 4%
C. 8%
D. 12%

7 ¿Cuál de las magnitudes siguientes es un escalar?

A. presión
B. aceleración
C. intensidad del campo gravitatorio
D. desplazamiento.

8 Se mide la intensidad de corriente de un reóstato y resulta ser 2,00 A ± 0,02A. ¿Cuál de las posibilidades siguientes identifica correctamente la incertidumbre absoluta y la incertidumbre en porcentaje de la corriente?

	Incertidumbre absoluta	Incertidumbre en porcentaje
A	± 0,02 A	± 1%
B	± 0,01 A	± 0,5%
C	± 0,02 A	± 0,01%
D	± 0,01 A	± 0,005%

© IB Organization

9 ¿Cuál de los valores siguientes representa una estimación razonable de la magnitud de la masa de un avión de gran tamaño?

A. 10^3 kg
B. 10^5 kg
C. 10^7 kg
D. 10^9 kg

10 ¿Cuál de las expresiones siguientes equivale a la unidad de la fuerza en el SI (el newton)?

A. kg m s^{-1}
B. kg m^2 s^{-1}
C. kg m s^{-2}
D. kg m^2 s^2

© IB Organization

2 Mecánica

IDEAS FUNDAMENTALES

- El movimiento se puede describir y analizar usando gráficas y ecuaciones.
- En física clásica se necesita la acción de una fuerza para cambiar un estado de movimiento, tal como sugiere Newton en sus leyes del movimiento.
- El concepto fundamental de energía es la piedra angular sobre la que se construye la ciencia.
- La conservación del momento es un ejemplo de ley inviolable.

2.1 Movimiento

El movimiento se puede describir y analizar usando gráficas y ecuaciones

La **cinemática** es el estudio de los objetos en movimiento. Los conceptos de física clásica que se presentan en este capítulo pueden aplicarse al movimiento de todas las masas, desde las más pequeñas (partículas atómicas que se mueven libremente) hasta las más grandes (estrellas).

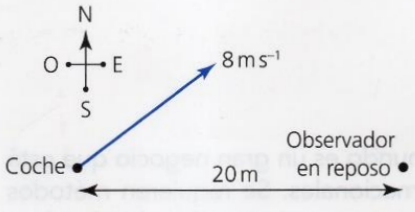


Figura 2.1
Descripción de la posición y el movimiento de un coche

Para describir completamente el movimiento de un objeto en un momento dado necesitamos decir dónde se encuentra, con qué rapidez se desplaza y en qué dirección. Por ejemplo, podemos observar que un coche se encuentra a 20 m hacia el oeste del observador y que se desplaza hacia el nordeste a una velocidad de 8 m s^{-1} (véase Figura 2.1).

No hace falta decir que alguna de estas cantidades o todas ellas pueden estar cambiando. En la vida real, el movimiento de un conjunto de objetos que están a su vez en movimiento puede ser complejo; de hecho, no acostumbran a moverse en línea recta, sino que pueden girar o incluso diversas partes pueden moverse en distintas direcciones.

En este capítulo intentaremos comprender los principios básicos de la cinemática mediante el estudio de objetos simples que se desplazan en línea recta, y los cálculos se limitarán a objetos que presentan un movimiento regular. Consideraremos los efectos de la resistencia del aire en apartados posteriores del capítulo.

Naturaleza de la ciencia

Todo se mueve

El estudio del movimiento debe ser necesariamente un pilar de la ciencia, porque *todo* se mueve. Las estrellas y las galaxias se alejan unas de otras a velocidades enormes, la Tierra describe órbitas alrededor del Sol y todo lo que hay sobre la Tierra gira alrededor de su eje una vez cada día. Los átomos y las moléculas están en constante movimiento, como también lo están las partículas subatómicas que hay en su interior. Por supuesto que en la vida diaria muchos objetos parecen estar parados, pero es solo porque los comparamos con su entorno. Si quisiéramos imaginar que un objeto estuviera absolutamente quieto, *no* en movimiento, no tendríamos manera de comprobarlo, porque todo movimiento lo es con respecto a algo.

Distancia y desplazamiento

El **desplazamiento** se define como la distancia en una dirección dada desde un punto de referencia fijado.

El desplazamiento de un objeto es su posición en comparación con un punto de referencia conocido. Por ejemplo, el desplazamiento del coche de la Figura 2.1 es de 20 m hacia el oeste del observador. Para especificar un desplazamiento necesitamos dar una distancia y una dirección desde el punto de referencia. Dicho punto se suele omitir porque es obvio: por ejemplo, podemos decir simplemente que un aeropuerto se encuentra a 50 km hacia el norte. Aunque un desplazamiento se puede producir en tres dimensiones, en este tema normalmente nos limitaremos a pensar que se produce en una o como máximo en dos dimensiones.

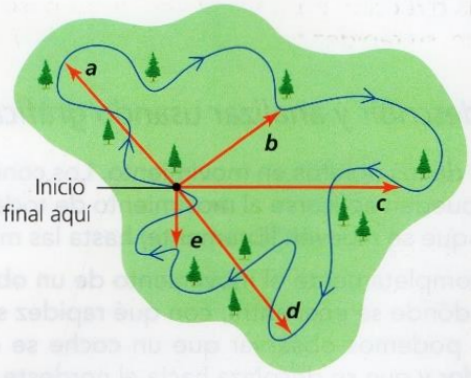
Utilizaremos el símbolo *e* tanto para el desplazamiento como para la distancia. El símbolo para la velocidad será *v*. El símbolo *h* se utiliza generalmente para distancias verticales (alturas). La

unidad del SI para la distancia es el metro, m, aunque frecuentemente se emplean también otras unidades, como el mm, el cm y el km.

Para especificar el desplazamiento necesitamos dar tanto su magnitud (tamaño) como su dirección, por tanto el desplazamiento es una magnitud **vectorial**. La distancia, en cambio, es una magnitud **escalar**, porque posee módulo pero no dirección.

La ruta de varias personas que pasean por un parque se muestra en la Figura 2.2. La *distancia* total recorrida es de 4 km, pero el desplazamiento desde el punto de referencia es variable y se muestra cada pocos minutos mediante las flechas **(a–e)**. El *desplazamiento* final es cero, porque los paseantes han vuelto a su punto de partida.

Figura 2.2
Paseo por el parque



El transporte de vehículos, bienes y personas alrededor del mundo es un gran negocio que está supervisado y controlado por muchos países y compañías internacionales. Se requieren métodos precisos de seguimiento de la localización y el desplazamiento de un gran número de vehículos (barcos, aviones, etc.), así como rapidez en la comunicación de esta información entre los distintos países.

Figura 2.3
Seguimiento del transporte



Rapidez y velocidad

La **rapidez** se define como la tasa de cambio de la distancia respecto al tiempo.

La rapidez es una magnitud escalar y se representa mediante el símbolo *v*. Su unidad en el SI son los metros por segundo, m s^{-1}.

La rapidez se calcula:

$$\text{rapidez} = \frac{\text{distancia recorrida}}{\text{tiempo que se ha tardado en recorrerla}}$$

Utilizamos el símbolo Δ cuando deseamos representar un (pequeño) cambio en algo, por tanto podemos definir la rapidez mediante símbolos de la manera siguiente:

$$v = \frac{\Delta e}{\Delta t}$$

Si un objeto se mueve con rapidez constante, determinar el valor de dicha rapidez es un cálculo sencillo. Sin embargo, la rapidez de un objeto frecuentemente cambia a lo largo del tiempo durante el cual lo observamos, de modo que el valor calculado es un **valor medio de la rapidez** durante

ese intervalo de tiempo. Por ejemplo, si un coche recorre una distancia de 120 km en 1,5 h, su rapidez media es de 80 km h^{-1}, pero su rapidez real habrá variado con seguridad a lo largo del trayecto. Podemos consultar en cualquier momento el velocímetro del coche para ver la **rapidez instantánea**, es decir, la rapidez en un determinado *instante*. En cinemática nos suelen interesar más los valores instantáneos de la rapidez (y de la velocidad y de la aceleración) que los valores medios.

La rapidez media se calcula sobre un intervalo de tiempo que sea lo suficientemente largo como para que la velocidad real haya cambiado. Los valores instantáneos deben calcularse a partir de medidas realizadas sobre intervalos muy cortos de tiempo (de modo que podamos asumir que durante este tiempo la rapidez ha sido constante).

La rapidez se calcula utilizando la distancia recorrida durante el tiempo que se está considerando, con independencia de la dirección del movimiento. Si los paseantes de la Figura 2.2 están 2 horas paseando por el parque, su rapidez media será $\Delta e/\Delta t$ (= 4/2) = 2 km h^{-1}.

Aplicaciones

Horarios de viaje

Los horarios del Ghan, un tren que viaja a través de Australia entre Adelaide y Darwin, con un tendido ferroviario de 2979 km de vías, se muestran en la Figura 2.4:

Adelaide – Alice Springs – Katherine – Darwin		
	Durante todo el año	**Servicios adicionales desde junio a agosto**
	Domingo	*Miércoles*
Salida desde Adelaide	12.20 p.m.	12.20 p.m.
	Lunes	*Jueves*
Llegada a Alice Springs	1.45 p.m.	1.45 p.m.
Salida de Alice Springs	6.00 p.m.	6.00 p.m.
	Martes	*Viernes*
Llegada a Katherine	9.00 a.m.	9.00 a.m.
Salida de Katherine	1.00 p.m.	1.00 p.m.
Llegada a Darwin	5.30 p.m.	5.30 p.m.

■ **Figura 2.4** *Horario del tren Ghan*

1 a Calcula el tiempo de trayecto y a partir del resultado la rapidez media.
b ¿Por qué es confusa tu respuesta al apartado **a**?

Normalmente nos interesa no solo la rapidez con la que se mueve un objeto, sino también la dirección de movimiento. Si damos la rapidez *y* la dirección, entonces la magnitud se denomina *velocidad*.

La **velocidad** se define como la tasa de cambio del desplazamiento respecto al tiempo (rapidez en una dirección dada):

$$v = \frac{\Delta e}{\Delta t}$$

Fíjate en que el símbolo Δ en esta ecuación se refiere al desplazamiento y no a la distancia global. (Para evitar confusiones, suele ser mejor definir la rapidez y la velocidad con palabras en lugar de símbolos).

La velocidad se representa con el mismo símbolo y tiene la misma unidad que la rapidez, pero debe darse también la dirección, ya que la velocidad es una magnitud vectorial. Sin embargo, si la dirección de movimiento no cambia, no es infrecuente referirse a la velocidad como rapidez; por ejemplo, decimos que una velocidad es de 4 m s^{-1}, porque la dirección se sobreentiende a partir del contexto.

Volviendo al ejemplo de los paseantes del parque, al final del paseo su rapidez media ha sido de 2 km h^{-1}, pero su velocidad media ha sido cero, porque el desplazamiento final ha sido cero. Sin embargo, no se trata de una información demasiado útil; es más probable que nos interese conocer la **velocidad instantánea** en varios instantes de tiempo durante el paseo.

Cuando la velocidad (o rapidez) de un objeto cambia a lo largo de un intervalo de tiempo, utilizamos el símbolo *u* para la *velocidad inicial* y el símbolo *v* para la *velocidad final* durante dicho intervalo. Estas velocidades no corresponden exactamente a las velocidades al inicio y al final del movimiento global, sino que corresponden simplemente a las velocidades al inicio y al final del periodo de tiempo considerado.

La distancia recorrida en un tiempo *t* puede determinarse mediante la ecuación:

distancia = rapidez media x tiempo

Para un objeto con aceleración *constante*:

$$\text{rapidez media} = \frac{1}{2}(\text{rapidez inicial} + \text{rapidez final})$$

Por ejemplo, si un coche acelera uniformemente desde 12 m s^{-1} hasta 16 m s^{-1}, su rapidez media durante este periodo de tiempo es de 14 m s^{-1}.

Mediante símbolos, puede expresarse como:

$$e = \left(\frac{v + u}{2}\right) t$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Registro de datos en los estudios de movimiento

La utilización de sensores de movimiento y de registradores de datos (véase Figura 2.5), detectores ópticos, temporizadores electrónicos y procedimientos de videograbación facilita algunos tipos de estudios de movimiento, haciéndolos más interesantes, más fáciles y más precisos.

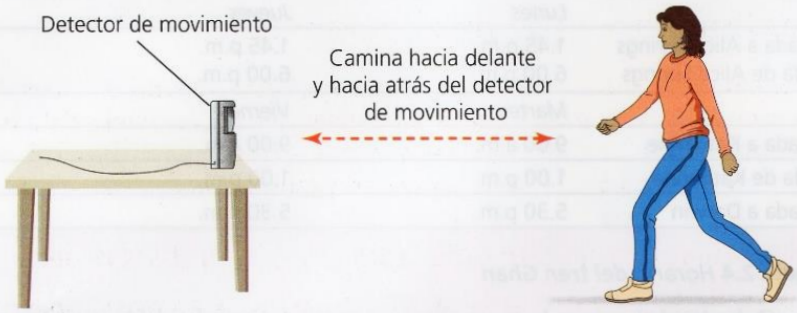


Figura 2.5 *Utilización de un detector de movimiento*

Aceleración

Cualquier variación del movimiento rectilíneo a velocidad constante se describe como una *aceleración*. Es muy importante comprender que ir más rápido, más lento y/o cambiar de dirección son distintas formas de aceleración (cambio de velocidad).

La **aceleración**, *a*, se define como la tasa de cambio de la velocidad respecto al tiempo:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - u}{t}$$ (si la aceleración es constante respecto al tiempo Δt)

La unidad del SI para la aceleración son los metros por segundo al cuadrado, m s^{-2} (las mismas unidades de la velocidad/tiempo, m s^{-1}/s). La aceleración es una magnitud vectorial.

La aceleración puede ser:

- un aumento de la velocidad (aceleración positiva)
- una disminución de la velocidad (aceleración negativa – a veces se denomina *deceleración*)
- un cambio de dirección.

Perspectivas adicionales

Tiempos de reacción cuando cronometramos movimientos

El tiempo que transcurre entre que algo ocurre y la respuesta mediante algún tipo de acción se denomina *tiempo de reacción*. El valor habitual suele ser de 0,20 s, pero puede variar de forma considerable en función de las condiciones asociadas. Una manera simple de medir el tiempo de reacción de una persona es midiendo la distancia que recorre una regla entre que se deja caer y se agarra con el pulgar y el índice. El tiempo puede calcularse mediante la ecuación $e = 5t^2$.

La medida puede repetirse vendando los ojos de la persona, con el objeto de comprobar si el tiempo de reacción cambia en función de si el estímulo (agarrar la regla) es sonoro o táctil en lugar de visual. Sea cual sea el tipo de prueba, nuestros tiempos de reacción son, con toda probabilidad, inconsistentes. Esto último significa que siempre que utilicemos cronómetros manuales, los resultados presentarán una incertidumbre inevitable (véase Capítulo 1). Lo más sensato es realizar medidas de tiempo lo más largas posibles para disminuir la importancia de este problema. (Así se reduce el porcentaje de incertidumbre). El efecto de los errores aleatorios también se puede reducir repitiendo las medidas y calculando el valor medio.

1 Utiliza el método descrito arriba (o cualquier otro) para medir tu tiempo de reacción cuando el estímulo es la vista. Repite la medida 10 veces.

a ¿Cuál ha sido el porcentaje de variación entre tu resultado medio y tu tiempo de reacción más rápido?

b ¿Mejora tu tiempo de reacción con la práctica?

Gráficas para describir el movimiento

Se pueden dibujar gráficas que representan cualquier tipo de movimiento y que proporcionan una comprensión adicional y una perspectiva (con solo una mirada) que difícilmente se pueden obtener a partir de las descripciones o las ecuaciones por escrito. Además, los gradientes de las curvas y las áreas bajo las curvas a menudo proporcionan una valiosa información adicional.

Gráficas desplazamiento–tiempo y gráficas distancia–tiempo

La figura 2.6 muestra la variación del desplazamiento de un objeto respecto a un punto de referencia en función del tiempo. Todos los ejemplos que aparecen en la Figura 2.6 son líneas rectas y puede decirse que representan **relaciones lineales**.

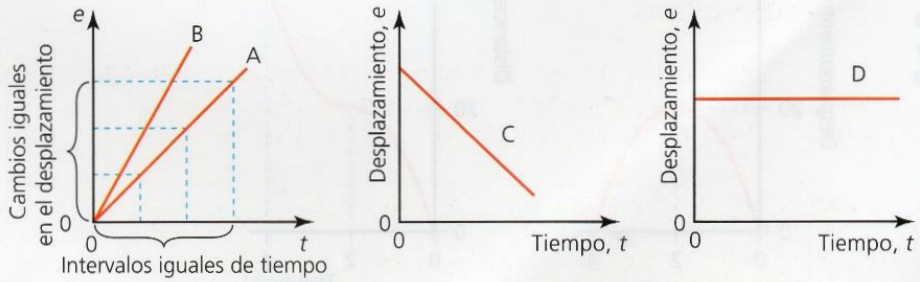


Figura 2.6
Velocidades constantes en gráficas de desplazamiento-tiempo (gráficas e-t)

- La recta A representa un objeto que se aleja de un punto de referencia de manera que a un mismo intervalo de tiempo le corresponde un mismo desplazamiento. Es decir, el objeto viaja a velocidad constante. Toda gráfica desplazamiento–tiempo lineal representa una velocidad constante (no tiene por qué empezar o acabar en el origen).
- La recta B representa un objeto que viaja a mayor velocidad que el objeto de la recta A.
- La recta C representa un objeto que se mueve cerca del punto de referencia.
- La recta D representa un objeto parado (en reposo). Tiene velocidad cero y se mantiene a la misma distancia del punto de referencia.

El desplazamiento es una magnitud vectorial, pero las gráficas desplazamiento–tiempo como las de las figuras anteriores se utilizan normalmente en situaciones donde el movimiento se produce en una dirección conocida, de modo que no hace falta expresarla de nuevo. El desplazamiento en sentidos opuestos se representa usando valores positivos y negativos. Esto último se muestra en la Figura 2.7, en la que la línea sólida representa el movimiento de un objeto que se desplaza a veloci-

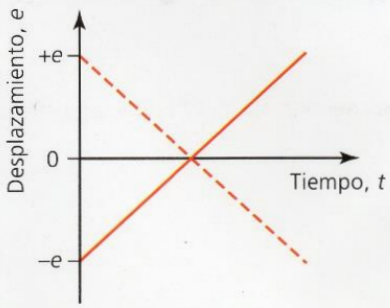


Figura 2.7
Movimiento en sentidos opuestos representado en una gráfica desplazamiento-tiempo

dad constante (positiva). El objeto se mueve hacia un punto de referencia (donde el desplazamiento es cero), llega a este y a continuación se aleja en sentido opuesto con la misma velocidad. La línea de puntos representa una rapidez idéntica en sentido contrario (o también podría representar el movimiento original si los sentidos definidos como positivo y negativo se intercambiaran).

Toda línea curva (no lineal) en una gráfica desplazamiento–tiempo representa una velocidad variable; en otras palabras, una aceleración (o deceleración). Esto último se ilustra en la Figura 2.8.

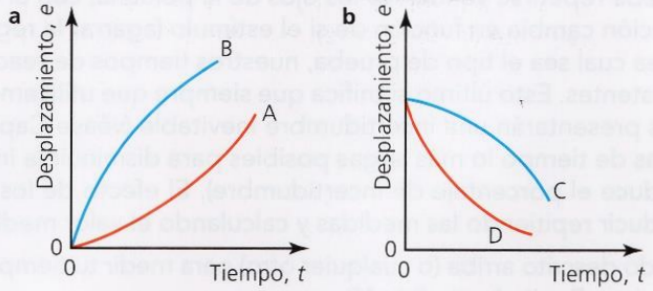


Figura 2.8 *Aceleraciones en gráficas desplazamiento-tiempo*

El movimiento de *alejamiento* respecto al punto de referencia se representa en la Figura 2.8a. La curva A representa un objeto que acelera. La curva B representa un objeto que decelera (aceleración negativa).

El movimiento de *acercamiento* hacia el punto de referencia se representa en la Figura 2.8b. La curva C representa un objeto que acelera. La curva D representa un objeto que decelera (aceleración negativa).

Los valores de la aceleración representados en estas gráficas pueden ser constantes o no (no puede determinarse sin un análisis más detallado).

En física normalmente interesan más las gráficas desplazamiento–tiempo que las gráficas distancia–tiempo. Para explicar la diferencia, consideremos la Figura 2.9. La gráfica desplazamiento–tiempo para un objeto lanzado verticalmente hacia arriba con una rapidez inicial de 20 m s^{-1}, sin resistencia del aire, se muestra en la Figura 2.9a. El objeto tarda 2 s en alcanzar la altura máxima de 20 m. En ese punto su velocidad instantánea es cero, antes de volver al punto de donde partió al cabo de 4 s y volver a ganar su velocidad inicial. El mismo movimiento en una gráfica general distancia–tiempo se muestra en la Figura 2.9b.

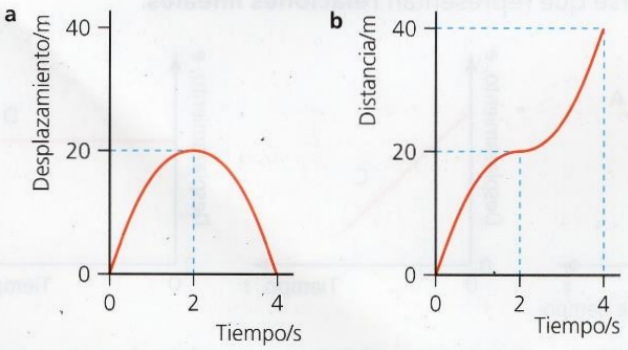


Figura 2.9 *Gráficas desplazamiento-tiempo y distancia-tiempo para un objeto que se mueve primero hacia arriba y después hacia abajo*

Gradientes de las gráficas de desplazamiento–tiempo

Consideremos el movimiento a velocidad constante que se representa en la Figura 2.10.

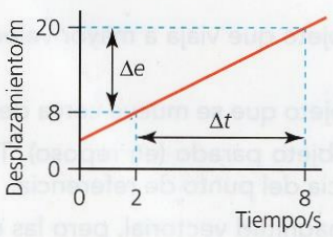


Figura 2.10 *Cómo calcular una velocidad constante a partir de una gráfica desplazamiento-tiempo*

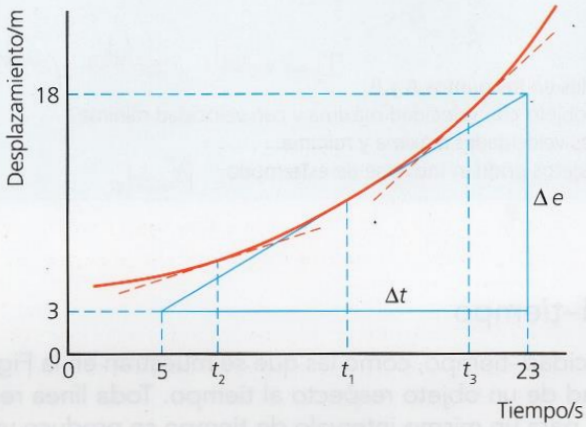
A partir de la gráfica, la velocidad *v* viene dada por:

$$v = \frac{\Delta e}{\Delta t} = \frac{20 - 8{,}0}{8{,}0 - 2{,}0} = 2{,}0\,\text{m}\,\text{s}^{-1}$$

Fíjate que la velocidad tiene el mismo valor numérico que el gradiente (pendiente) de la curva. Esto último siempre es cierto, con independencia de la forma de la curva.

La **velocidad instantánea** de un objeto es igual al gradiente de la curva de desplazamiento–tiempo en ese instante.

El movimiento de un objeto que se mueve con velocidad cada vez mayor se representa en la Figura 2.11. La velocidad en cada instante de tiempo (por ejemplo t_1) puede determinarse mediante el cálculo del gradiente (la pendiente) de la recta tangente a la curva en ese instante.



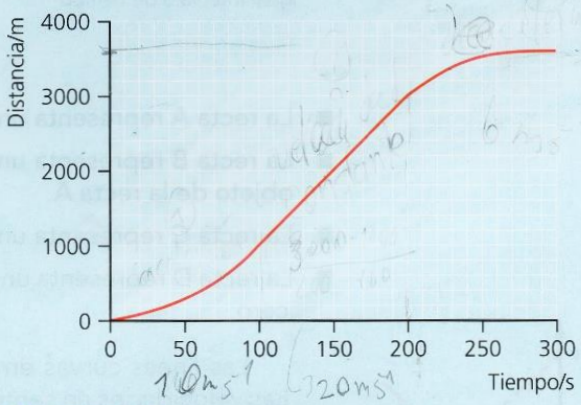
■ **Figura 2.11** *Determinación de la velocidad instantánea a partir de la curva de una gráfica desplazamiento-tiempo*

El triángulo utilizado debe ser grande con el objetivo de que este proceso sea lo más preciso posible. La tangente correspondiente al instante t_2 tiene un menor gradiente (pendiente) porque la velocidad es menor. En el instante t_3 la velocidad es mayor y el gradiente (pendiente) es más escarpado. Así, en este ejemplo:

$$\text{velocidad en } t_1 = \frac{18 - 3{,}0}{23 - 5{,}0} = \frac{15}{18} = 0{,}83\,\text{m s}^{-1}$$

1 El movimiento de un tren que viaja por una vía recta entre dos estaciones se representa en la Figura 2.12.

- **a** Describe el movimiento.
- **b** ¿A qué distancia se encuentran las dos estaciones?
- **c** Calcula la velocidad máxima que ha alcanzado el tren.
- **d** ¿Cuál ha sido la rapidez media del tren entre las dos estaciones?



■ **Figura 2.12**

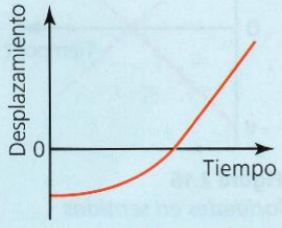
2 **a** Dibuja una gráfica desplazamiento–tiempo para un nadador que nada 50 m a una rapidez constante de 1,0 m s^{-1} si la piscina tiene 25 m de longitud y el nadador tarda 1 s en darse la vuelta para completar la carrera.

b Averigua la rapidez media del campeón mundial de estilo libre cuando se batió por última vez el récord de los 100 m.

c El récord mundial de natación para 50 m en una piscina de 25 m de longitud es más rápido que para una piscina de 50 m. Explica por qué.

3 Dibuja una gráfica desplazamiento–tiempo para el movimiento siguiente: un coche parado se encuentra a 25 m; al cabo de 2 s empieza a moverse alejándose en línea recta de ti con una aceleración constante de 1,5 m s^{-2} durante 4 s; después continúa a velocidad constante durante otros 8 s.

4 Describe el movimiento del corredor representado en la gráfica de la Figura 2.13.



■ **Figura 2.13**

5 **a** Describe el movimiento representado por la gráfica de la Figura 2.14.

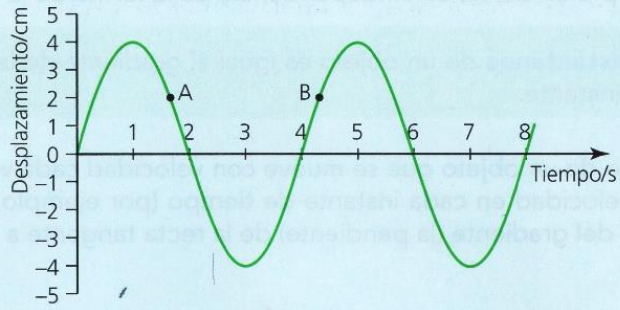


Figura 2.14

b Compara las velocidades en los puntos A y B.
c ¿Cuándo se mueve el objeto con velocidad máxima y con velocidad mínima?
d Estima los valores de las velocidades máxima y mínima.
e Sugiere qué tipo de objetos podrían moverse de este modo.

Gráficas velocidad–tiempo

En toda gráfica velocidad–tiempo, como las que se muestran en la Figura 2.15, se representa la variación de la velocidad de un objeto respecto al tiempo. Toda línea recta en una gráfica velocidad–tiempo indica que para un mismo intervalo de tiempo se produce un mismo cambio de velocidad, es decir, una aceleración constante.

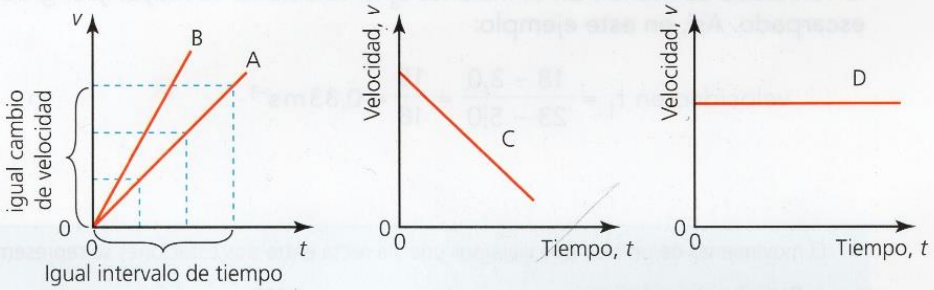


Figura 2.15
Aceleración constante en gráficas velocidad-tiempo

- La recta A representa un objeto que tiene una aceleración positiva constante.
- La recta B representa un objeto que se mueve con una aceleración positiva mayor que la del objeto de la recta A.
- La recta C representa un objeto que está decelerando (aceleración negativa).
- La recta D representa un objeto que se mueve a velocidad constante, es decir, con aceleración cero.

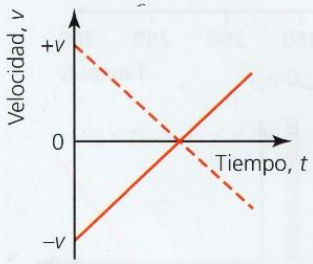


Figura 2.16
Velocidades en sentidos contrarios

Las líneas curvas en las gráficas velocidad–tiempo representan aceleraciones variables. Las velocidades en sentidos opuestos se representan mediante valores positivos y negativos. La línea sólida de la Figura 2.16 representa un objeto que decelera uniformemente hasta velocidad cero y después se mueve en sentido contrario con una aceleración del mismo módulo. Esta gráfica podría representar el movimiento de una piedra lanzada al aire que alcanza su máxima altura para caer de nuevo a continuación. La aceleración permanece constante (9,81 m s^{-2} hacia abajo). En este ejemplo, a la velocidad y a la aceleración hacia arriba se les ha otorgado signo negativo, de manera que la velocidad y la aceleración hacia abajo son positivas. La línea discontinua representa el mismo movimiento si se eligen el sentido positivo y negativo al revés.

Gradientes de las gráficas velocidad–tiempo

Consideremos el movimiento a aceleración constante que se muestra en la Figura 2.17.

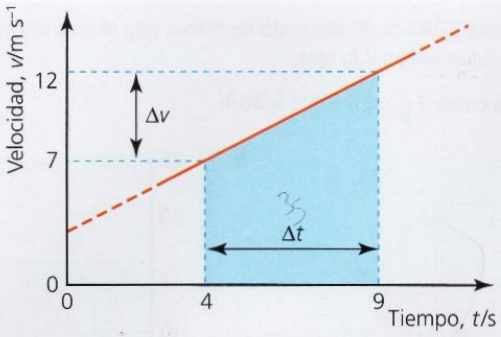


Figura 2.17
Determinación del gradiente de una gráfica velocidad-tiempo

A partir de la gráfica:

$$\text{aceleración, } a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{12 - 7{,}0}{9{,}0 - 4{,}0} = 1{,}0\,\text{m s}^{-2}$$

Observa que la aceleración tiene el mismo valor numérico que el gradiente (la pendiente) de la curva. Esto es siempre cierto, con independencia de la forma de la curva.

La **aceleración instantánea** de un objeto es igual al gradiente de la gráfica velocidad-tiempo en ese instante.

Ejemplo resuelto

1 La curva de color rojo de la Figura 2.18 muestra un objeto que está decelerando (con una aceleración negativa que va disminuyendo). Utiliza la gráfica para determinar la aceleración instantánea en el instante de tiempo 10 s.

Podemos utilizar la tangente a la curva en el instante de tiempo 10 s para determinar el valor de la aceleración en ese instante:

$$\text{aceleración, } a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{0 - 12}{22 - 0} = -0{,}55\,\text{m s}^{-2}$$

En este ejemplo, el triángulo de gran tamaño que se ha utilizado para determinar el gradiente con precisión se ha dibujado extendiendo la tangente hacia los ejes por comodidad.

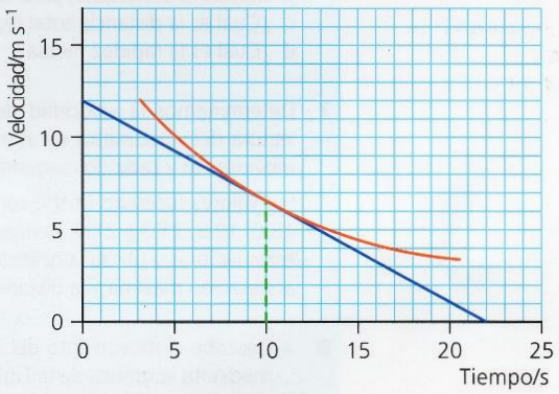


Figura 2.18
Determinación de la aceleración instantánea a partir de una gráfica velocidad-tiempo

Áreas bajo las curvas velocidad–tiempo

Consideremos de nuevo el movimiento representado en la Figura 2.17. El cambio en el desplazamiento, *e*, entre los segundos cuarto y noveno podemos determinarlo a partir de (velocidad media) × tiempo.

$$e = \frac{12 + 7{,}0}{2} \times (9{,}0 - 4{,}0) = 48\,\text{m}$$

Este valor numérico coincide con el del área bajo la curva entre $t = 4{,}0\,\text{s}$ y $t = 9{,}0\,\text{s}$ (y que corresponde al área sombreada de la Figura 2.17). Esto último siempre es cierto, con independencia de la forma de la curva.

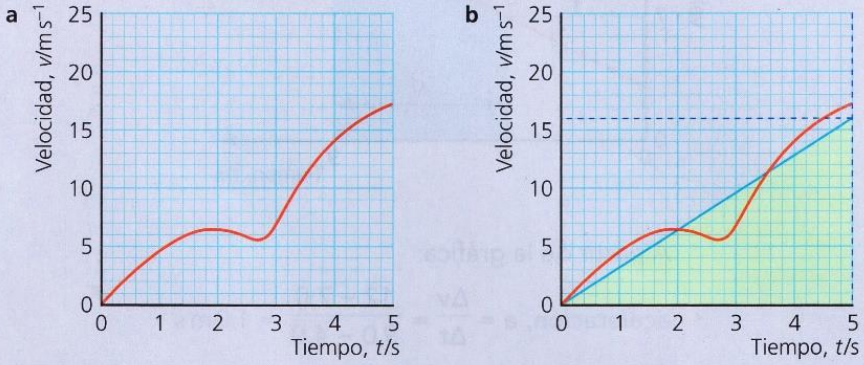
El área bajo una curva velocidad–tiempo es igual al cambio de desplazamiento en el tiempo dado.

Ejemplo resuelto

2 El cambio en la velocidad de un coche durante los 5 s posteriores al inicio del movimiento se muestra en la Figura 2.19a. Utiliza la gráfica para estimar la distancia recorrida durante este periodo de tiempo.

La recta de color azul de la Figura 2.19b se ha dibujado de forma que el área encerrada bajo esta recta equivalga al área encerrada bajo la curva original (a ojo).

$$\text{distancia} = \text{área bajo la curva} = \frac{1}{2} \times 16 \times 5{,}0 = 40\,\text{m}$$



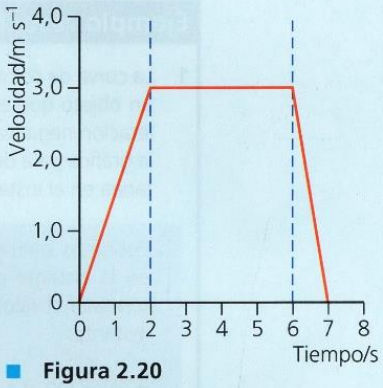
■ **Figura 2.19** *Determinación del desplazamiento de un coche durante la aceleración*

6 **a** Describe el movimiento representado mediante la gráfica de la Figura 2.20.
b Calcula la aceleración para las tres partes del trayecto.
c ¿Cuál es la distancia total recorrida?
d ¿Cuál es la rapidez media?

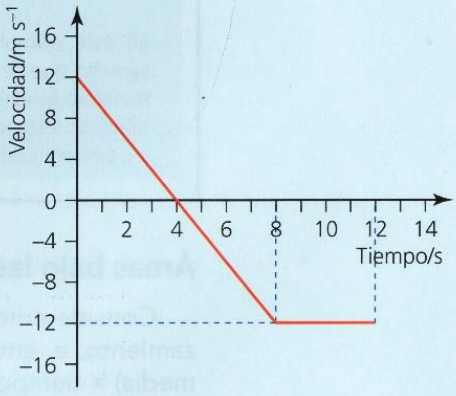
7 Determinamos la velocidad de un coche mediante la lectura del velocímetro en el momento en que inicia el movimiento y cada dos segundos a partir de entonces. Los valores sucesivos ($m\,s^{-1}$) son: 0; 1,1; 2,4; 6,9; 12,2; 18,0; 19,9; 21,3 y 21,9. Representa gráficamente estas lecturas y utiliza la gráfica para determinar la aceleración máxima y la distancia recorrida en 16 s.

8 **a** Describe el movimiento del objeto que se representa mediante la gráfica de la Figura 2.21.
b Calcula la aceleración durante los primeros 8 s.
c ¿Cuál es la distancia total recorrida en 12 s?
d ¿Cuál es el desplazamiento total al cabo de 12 s?
e ¿Cuál es la rapidez media durante el intervalo de 12 s?

9 Dibuja esquemáticamente una gráfica velocidad–tiempo para el movimiento siguiente: un coche viaja a una velocidad constante de 25 m s^{-1} por una carretera recta hacia ti y se encuentra a 200 m de ti. Dos segundos después de pasar por delante de ti, el conductor decelera uniformemente y el coche se para a 62,5 m de ti.



■ **Figura 2.20**



■ **Figura 2.21**

Aplicaciones

Biomecánica y velocistas de 100 m lisos

Los velocistas de categoría mundial pueden recorrer 100 m lisos en unos 10 s (véase Figura 2.22). La velocidad media es fácil de calcular: $v = 100/10 = 10\,m\,s^{-1}$. Evidentemente, parten de $0\,m\,s^{-1}$, de manera que su velocidad instantánea máxima debe ser mayor de $10\,m\,s^{-1}$.

Los entrenadores emplean la ciencia denominada *biomecánica* para perfeccionar las técnicas de los atletas y utilizan asimismo los métodos informáticos más novedosos para analizar cada momento de la carrera. La aceleración a partir de los bloques de salida es extremadamente importante, ya que interesa alcanzar la máxima velocidad tan pronto como sea posible. Durante el resto de la carrera, el atleta debe ser capaz de mantener la misma velocidad, aunque puede producirse un cierto descenso hacia el final de la carrera. En la Figura 2.23 se muestra una gráfica velocidad–tiempo típica para una carrera de 100 m lisos, completada en 10 s.



Figura 2.22
Usain Bolt batió el récord mundial de los 100 m lisos con un tiempo de 9,58 s en Berlín en el año 2009

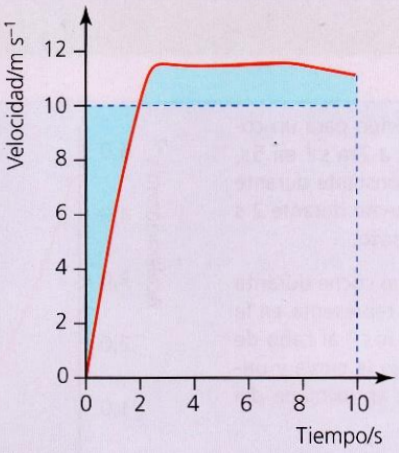


Figura 2.23
Gráfica velocidad–tiempo para un atleta que corre los 100 m lisos

1 a Estima la mayor aceleración alcanzada durante la carrera que se ilustra en la Figura 2.23.

b ¿Cuándo alcanza el atleta su mayor velocidad?

c Explica por qué son iguales las dos áreas sombreadas de la gráfica.

d Dibuja una gráfica donde se represente la variación del récord mundial (u olímpico) de los 100 m lisos a lo largo de los últimos 100 años. Utiliza Internet para encontrar los datos necesarios.

e Predice el récord de los 100 m lisos para el año 2040.

Gráficas aceleración–tiempo

En una gráfica aceleración–tiempo (*a*–*t*), como la que se muestra en la Figura 2.24, se representa la variación de la aceleración de un objeto respecto al tiempo. En este capítulo nos interesan más las aceleraciones constantes (las gráficas de movimiento con aceleración variable son menos frecuentes). En las gráficas de la Figura 2.24 se muestran cinco rectas que representan aceleraciones constantes.

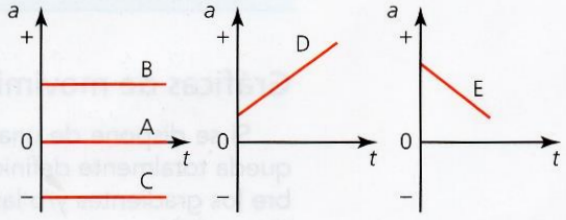


Figura 2.24
Gráficas de aceleración constante

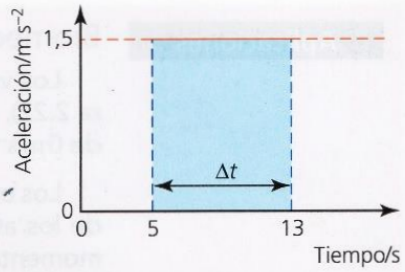
- La recta A indica aceleración cero, velocidad constante.
- La recta B indica una aceleración positiva constante (velocidad que aumenta uniformemente).
- La recta C muestra la aceleración negativa constante (deceleración) de un objeto que disminuye su velocidad a una tasa constante.
- La recta D muestra una aceleración positiva en aumento (linealmente).
- La línea E muestra un objeto que está acelerando positivamente aunque a una tasa (linealmente) decreciente.

Áreas bajo las gráficas aceleración–tiempo

La aceleración constante de un coche en movimiento se muestra en la Figura 2.25. Utilizando la ecuación $a = \Delta v/\Delta t$, entre los segundos 5 y 13, la velocidad del coche aumenta en:

$$\Delta v = a\Delta t = 1{,}5 \times 8{,}0 = 12\,\text{m s}^{-1}$$

El cambio en la velocidad tiene el mismo valor numérico que el área encerrada bajo la curva entre $t = 5\,\text{s}$ y $t = 13\,\text{s}$ (área sombreada de la Figura 2.25). Esto es siempre cierto, con independencia de la forma de la curva.



■ **Figura 2.25** *Cálculo del cambio de velocidad a partir de una gráfica aceleración-tiempo*

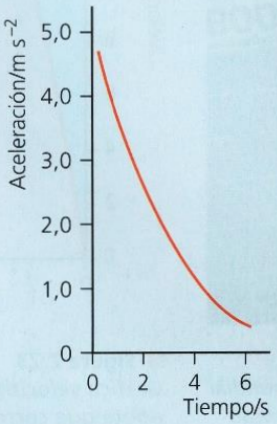
El área encerrada bajo una gráfica aceleración-tiempo es igual al cambio de la velocidad en el periodo de tiempo dado.

10 Dibuja una gráfica aceleración-tiempo para un coche que parte del reposo, acelera a $2\,\text{m s}^{-2}$ en 5 s, a continuación viaja a velocidad constante durante 8 s y después decelera uniformemente durante 2 s más hasta quedar de nuevo en reposo.

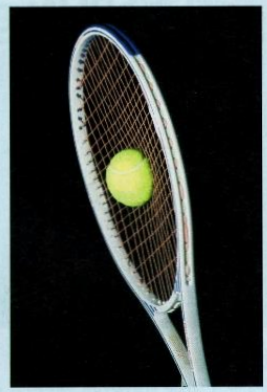
11 La variación de la aceleración de un coche durante un intervalo de tiempo de 6 s se representa en la Figura 2.26. Si el coche viaja a $2\,\text{m s}^{-1}$ al cabo de 1 s, estima un área adecuada bajo la curva y utilízala para determinar la rapidez aproximada del coche al cabo de 5 s.

12 En la Figura 2.27 se muestra una pelota de tenis en el momento de ser golpeada por una raqueta. Dibuja esquemáticamente una posible gráfica velocidad-tiempo y una gráfica aceleración-tiempo para un intervalo de tiempo que vaya desde 1 s antes del impacto hasta 1 s después del impacto.

13 Dibuja esquemáticamente una posible gráfica desplazamiento-tiempo y una gráfica velocidad-tiempo para una pelota que rebota y que se lanza desde un estado de reposo. Continúa el esquema hasta la tercera vez que la pelota rebota contra el suelo.



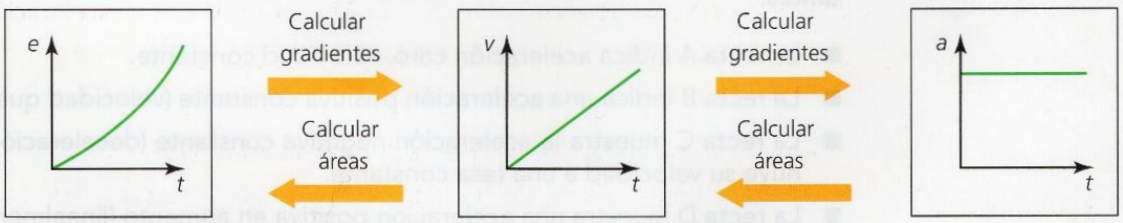
■ **Figura 2.26**



■ **Figura 2.27** *Impacto de una pelota de tenis contra una raqueta*

Gráficas de movimiento: resumen

Si se dispone de una cualquiera de las gráficas de movimiento (*e–t*, *v–t* o *a–t*), el movimiento queda totalmente definido y se pueden dibujar las otras dos gráficas a partir de la información sobre los gradientes y/o las áreas correspondientes a la primera gráfica. Esto último se resume en la Figura 2.28.



■ **Figura 2.28** *Conexiones entre las diferentes gráficas de movimiento*

Reproducir a mano una de las gráficas a partir de otra es un proceso largo y repetitivo, ya que para obtener gráficas precisas hay que realizar un gran número de medidas y cálculos similares sobre periodos cortos de tiempo. Los ordenadores son, por descontado, ideales para este propósito.

Si se poseen conocimientos avanzados de matemáticas, que no forman parte de este curso, se puede utilizar el *cálculo infinitesimal* para llevar a cabo estos procesos mediante la derivación y la integración.

Aplicaciones

Ecuaciones cinemáticas: distancias de frenado

En la Figura 2.29 se representa la variación de las velocidades de dos coches idénticos desde el momento en que sus conductores se percatan de un peligro enfrente de ellos e intentan detener sus coches lo más rápidamente posible. Suponemos que ambos conductores tienen el mismo tiempo de reacción (0,7 s) y que ambos coches deceleran con una misma tasa (–5,0 m s^{-2}).

La distancia recorrida a velocidad constante antes de que el conductor reaccione y pise el pedal del freno se conoce como «distancia de reacción». La distancia recorrida mientras el coche decelera se denomina «distancia de frenado». La distancia total de detención es la suma de ambas distancias.

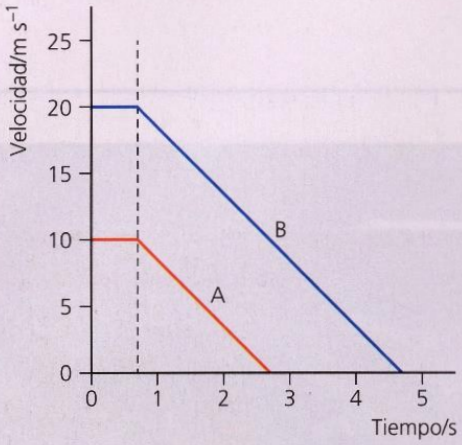


Figura 2.29
Gráficas velocidad–tiempo para dos coches que frenan

Al coche B, que viaja al doble de la velocidad del coche A, le corresponde el doble de la distancia de reacción. Es decir, la distancia de reacción es proporcional a la velocidad del coche. La distancia recorrida cuando se frena, sin embargo, es proporcional al *cuadrado* de la velocidad. Esto último se puede confirmar a partir de las áreas encerradas bajo las gráficas *v*–*t*. El área encerrada bajo la gráfica B es cuatro veces el área encerrada bajo la gráfica A (durante la deceleración). Este hecho tiene importantes consecuencias en la seguridad vial y, en la mayoría de países, la variación de la distancia de detención respecto a la velocidad del vehículo es objeto de estudio en las escuelas de conducción. En algunos países, los candidatos a la obtención del permiso de conducir deben pasar una prueba en la que se mide su tiempo de reacción.

Elabora una hoja de cálculo para calcular la distancia total de detención para coches que viajan a una rapidez inicial, *u*, entre 0 y 40 m s^{-1} con una deceleración de –6,5 m s^{-2}. (Haz cálculos cada 2 m s^{-1}). La distancia de reacción se puede calcular a partir de $e_r = 0{,}7\ u$ (tiempo de reacción 0,7 s). En este ejemplo el tiempo de frenado se puede calcular a partir de $t_f = u/6{,}5$ y la distancia de frenado se puede calcular a partir de $e_f = (u/2)\ t_f$. Emplea los datos calculados para generar una gráfica creada por ordenador en la que se represente la distancia de detención (eje *y*) respecto a la rapidez inicial (eje *x*).

euvat

Ecuaciones de movimiento en caso de aceleración uniforme

Las cinco cantidades *u*, *v*, *a*, *e* y *t* son todo lo que necesitamos para describir completamente el movimiento de un objeto que se mueve con aceleración uniforme (constante).

- *u* = velocidad (rapidez) al inicio del tiempo *t*
- *v* = velocidad (rapidez) al final del tiempo *t*
- *a* = aceleración (constante)
- e = distancia recorrida en el tiempo *t*
- *t* = tiempo que tarda la velocidad (rapidez) en pasar del valor *u* al valor *v* y recorrer una distancia *e*

Si se conocen tres de las cantidades anteriores, las otras dos se pueden calcular mediante las dos ecuaciones que se indican debajo. Si conocemos la velocidad inicial *u* y la aceleración *a* de un objeto, y la aceleración es uniforme, entonces podemos determinar su velocidad final *v* al cabo de un tiempo *t* reorganizando la ecuación utilizada para definir la aceleración. El resultado es:

$$v = u + at$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

También hemos visto que la distancia recorrida cuando se acelera uniformemente desde una velocidad *u* hasta una velocidad *v* en un tiempo *t* se puede calcular a partir de:

$$e = \frac{(v + u)t}{2}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Estas dos ecuaciones se pueden combinar matemáticamente para obtener dos ecuaciones más que se muestran a continuación y que también figuran en *Apéndice de datos de Física*. Estas útiles ecuaciones no comportan más teoría física, sino que simplemente expresan los mismos principios físicos de diferente modo.

$$v^2 = u^2 + 2ae$$

$$e = ut + \frac{1}{2}at^2$$

Recuerda que las cuatro ecuaciones de movimiento solo se pueden utilizar si la aceleración es uniforme durante el tiempo considerado.

Las ecuaciones del movimiento también se tratan en el curso de Matemáticas IB (también se desarrollan utilizando el cálculo infinitesimal).

Ejemplos resueltos

3 Un coche de carreras de Fórmula 1 (véase Figura 2.30) acelera *desde el estado de reposo* (es decir, al principio estaba parado) hasta $18\,m\,s^{-2}$.

a ¿Cuál es su rapidez al cabo de 3 s?

b ¿Cuánto espacio ha recorrido hasta este momento?

c Si continúa acelerando al mismo ritmo, ¿cuál será su velocidad cuando haya recorrido 200 m desde el estado de reposo?

d Convierte la velocidad final a $km\,h^{-1}$.



■ **Figura 2.30** *Los coches de Fórmula 1 están listos para comenzar el Gran Premio de Canadá*

a $v = u + at$

$v = 0 + (18 \times 3{,}0)$

$v = 54\,m\,s^{-1}$

b $e = \frac{v + u}{2}t$

$e = \frac{0 + 54}{2} \times 3{,}0$

$e = 81\,m$

Pero hay que tener en cuenta que la distancia se puede calcular directamente, sin calcular primero la velocidad final, de la manera siguiente:

$e = ut + \frac{1}{2}at^2$

$e = (0 \times 3{,}0) + (0{,}5 \times 18 \times 3{,}0^2)$

$e = 81\,m$

c $v^2 = u^2 + 2ae$

$v^2 = 0^2 + (2 \times 18 \times 200)$

$v^2 = 7200$

$v = 85\,m\,s^{-1}$

d $85\,m\,s^{-1} = 85 \times 3600 = 3{,}1 \times 10^5\,m\,h^{-1}$

$3{,}1 \times 10^5\,m\,h^{-1} = \frac{3{,}1 \times 10^5}{10^3} = 310\,km\,h^{-1}$

4 Un tren que viaja a 50 $m\,s^{-1}$ (180 $km\,h^{-1}$) necesita decelerar uniformemente para poder detenerse en una estación que se encuentra a 2 kilómetros.

a ¿Cuál es la deceleración necesaria?

b ¿Cuánto tarda el tren en detenerse?

a $v^2 = u^2 + 2ae$

$0^2 = 50^2 + (2 \times a \times 2000)$

$a = \frac{-50^2}{2 \times 2000}$

$a = -0{,}63\,m\,s^{-2}$

b $v = u + at$

$0 = 50 + (-0{,}625) \times t$

$t = \frac{50}{0{,}625} = 80\,s$

(Como forma alternativa se podría haber usado $e = \frac{u + v}{2}t$)

Supón que todas las aceleraciones son constantes.

14 Una pelota rueda por una pendiente con aceleración constante. Cuando pasa por un punto P su velocidad es $1{,}2\,m\,s^{-1}$ y al cabo de un breve periodo de tiempo pasa por el punto Q con una velocidad de $2{,}6\,m\,s^{-1}$.
- **a** ¿Cuál es la velocidad media entre P y Q?
- **b** Si tarda 1,4 s en ir de P a Q, ¿cuál es la distancia PQ?
- **c** ¿Cuál es la aceleración de la pelota?

15 Un avión acelera por una pista desde el estado de reposo y despega con una velocidad de $86{,}0\,m\,s^{-1}$. Su aceleración durante este tiempo es $2{,}40\,m\,s^{-2}$.
- **a** ¿Qué distancia recorre el avión por la pista antes de despegar?
- **b** ¿Cuánto tiempo transcurre entre que el avión comienza a acelerar y el despegue?

16 Un petrolero transoceánico no puede decelerar a más de $0{,}0032\,m\,s^{-2}$.
- **a** ¿Cuál es la mínima distancia que necesita el barco para detenerse si viaja a 10 nudos? (1 nudo = $0{,}514\,m\,s^{-1}$)
- **b** ¿Cuánto tiempo requiere esta deceleración?

17 En un anuncio publicitario para un nuevo coche se afirma que puede recorrer 100 m desde el estado de reposo en 8,2 s.
- **a** ¿Cuál es la aceleración media?
- **b** ¿Cuál es la velocidad del coche al cabo de este tiempo?

18 Un coche que viaja a una velocidad constante de $21\,m\,s^{-1}$ (más rápido que el límite de velocidad establecido en $50\,km\,h^{-1}$) pasa por delante de un coche de policía que está parado. El coche de policía acelera hacia el coche infractor con una aceleración de $4{,}0\,m\,s^{-2}$ durante 8 s y después continúa con la misma velocidad hasta que adelanta al coche infractor.
- **a** ¿Cuándo tienen ambos coches la misma velocidad?
- **b** ¿Ha adelantado el coche de policía al coche infractor al cabo de 10 s?
- **c** Determina el momento exacto en el que el coche de policía adelanta al coche infractor igualando las dos ecuaciones para la misma distancia y el mismo tiempo.

19 Un coche frena de repente y se detiene al cabo de 2,4 s, tras haber recorrido una distancia de 38 m.
- **a** ¿Cuál es su deceleración?
- **b** ¿Cuál es la velocidad del coche antes de frenar?

20 Una nave espacial que viaja a $8{,}00\,km\,s^{-1}$ acelera a $2{,}00 \times 10^{-3}\,m\,s^{-2}$ durante 100 horas.
- **a** ¿Cuál es la rapidez final?
- **b** ¿Cuánto espacio recorre durante su aceleración?

21 Combina las dos primeras ecuaciones del movimiento (se dan en la página 33) para derivar a partir de ellas las otras dos ($v^2 = u^2 + 2ae$ y $e = ut + \frac{1}{2}at^2$).

Naturaleza de la ciencia

Observaciones

El conocimiento científico solo se ha desarrollado verdaderamente desde que se ha comprendido la importancia de los datos experimentales.

Las ecuaciones del movimiento (y las leyes del movimiento de Newton) son una parte muy importante de la física clásica que todo estudiante debe comprender bien. Se propusieron en los inicios del desarrollo histórico de la física, cuando las técnicas experimentales no estaban tan desarrolladas como lo están en la actualidad. Sin embargo, estas ideas fundamentales sobre el movimiento siguen siendo igual de importantes en el mundo moderno.

Los primeros científicos, como Galileo y Newton, llevaron a cabo observaciones cuidadosas y recogieron los suficientes datos para respaldar sus teorías sobre el movimiento ideal, a pesar de que la fricción y la resistencia del aire siempre complican el estudio de los objetos en movimiento. Esto es especialmente impresionante, porque algunas de sus teorías contradecían ideas que habían sido aceptadas durante 2000 años.

Aceleración debida a la gravedad

Todos estamos familiarizados con el movimiento de objetos que caen hacia la Tierra a causa de la fuerza de la gravedad. En la Figura 2.31 se muestra un experimento para la recogida de datos de distancias y tiempos en el caso de una masa que cae. Con estos datos se puede calcular el valor de su aceleración. El temporizador electrónico empieza a contar cuando se desconecta la corriente del electroimán y la bola de acero empieza a caer. Cuando la bola impacta con la trampilla colocada en la parte inferior, se desconecta una segunda corriente eléctrica y el temporizador se detiene. Como opción alternativa se puede utilizar un sensor para monitorizar la caída de la bola.

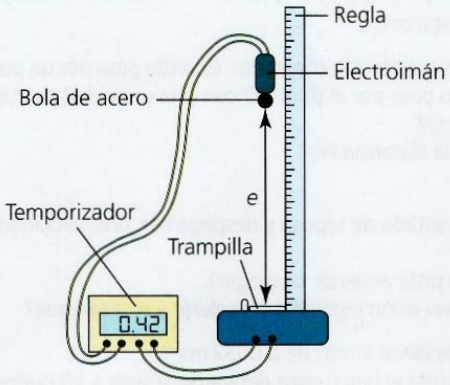


Figura 2.31
Experimento para medir la aceleración debida a la gravedad

Ejemplo resuelto

5 Supón que cuando la masa cae 0,84 m se mide un tiempo de 0,42 s. Calcula su aceleración gravitatoria.

$$e = ut + \frac{1}{2}at^2$$

$$0{,}84 = 0 + (0{,}5 \times a \times 0{,}42^2)$$

$$a = \frac{0{,}84}{0{,}088} = 9{,}5\,\text{m s}^{-2}$$

Ciudad	g/m s^{-2}
Auckland	9,799
Bangkok	9,783
Buenos Aires	9,797
Ciudad del Cabo	9,796
Chicago	9,803
Kuwait	9,793
Londres	9,812
La Paz	9,784
Ciudad de México	9,779
Tokio	9,798

Tabla 2.1
Valores de g en algunas ciudades del mundo

Evidentemente, para la obtención de un resultado exacto y fiable es necesario hacer más medidas. Se pueden repetir las medidas para una misma altura, de modo que se puedan calcular promedios. No obstante, sería mejor realizar medidas para diferentes alturas con el objeto de poder dibujar una gráfica, que siempre es un método mejor para evaluar errores aleatorios y sistemáticos.

Si se realizan medidas precisas en el vacío (para asegurarnos de que no hay resistencia del aire), los resultados correspondientes a todas las ubicaciones terrestres son muy similares (aunque no idénticos). Se muestran algunos ejemplos de estas medidas en la Tabla 2.1.

La **aceleración debida a la gravedad** en el vacío cerca de la superficie de la Tierra se representa con el símbolo g. También se la denomina **aceleración de caída libre**. El valor aceptado para g es 9,81 m s^{-2}. Este es el valor que debe utilizarse en los cálculos y figura en el *Apéndice de datos de Física*. Cualquier punto sobre la superficie de la Tierra (o en un avión) puede considerarse un punto «cerca de la superficie de la Tierra».

Es muy importante recordar que *todos los objetos que se mueven libremente* cerca de la superficie de la Tierra experimentan esta misma aceleración, g, hacia abajo. Esto es cierto con independencia de si el objeto es grande o pequeño, o si se está moviendo hacia arriba, hacia abajo, lateralmente o en cualquier otra dirección. «Moverse libremente» significa que se pueden ignorar los efectos de la resistencia del aire y que el objeto no está accionado de algún modo. En la realidad, sin embargo, los efectos de la resistencia del aire normalmente no se pueden ignorar, excepto en el caso de masas grandes y densas que recorren distancias cortas desde una posición de reposo. Pero, como ocurre a menudo en el caso de la ciencia, necesitamos comprender primero ejemplos simplificados antes de abordar situaciones más complejas.

Ejemplos resueltos

6 Una moneda en reposo cae por una ventana abierta y recorre 16 m hasta llegar al suelo. Suponiendo que no hay resistencia del aire:

a ¿Cuál es su velocidad cuando impacta contra el suelo?

b ¿Cuánto tarda en recorrer esta distancia?

a $v^2 = u^2 + 2ae$
$v^2 = 0^2 + (2 \times 9{,}81 \times 16) = 314$
$v = 18\,\text{m s}^{-1}$

b $v = u + at$
$18 = 0 + 9{,}81t$
$t = \dfrac{18}{9{,}81} = 1{,}8\,\text{s}$

7 Se lanza una bola verticalmente hacia arriba y alcanza una altura máxima de 21,4 m
a Calcula la rapidez con la que se lanza la bola.
b ¿Qué supuestos has tenido en cuenta?
c ¿Dónde estará la bola al cabo de 3,05 s de su lanzamiento?
d ¿Cuál será su velocidad en ese momento?

a $v^2 = u^2 + 2ae$
Cuando la bola recorra una distancia $e = 21{,}4$ m su rapidez, v, en el punto más alto será cero.
$0^2 = u^2 + (2 \times -9{,}81 \times 21{,}4)$
$u^2 = 419{,}9$
$u = 20{,}5\,\text{m s}^{-1}$

En este ejemplo, las cantidades vectoriales con sentido hacia arriba (u, v, e) se consideran positivas y la cantidad con sentido hacia abajo (a), negativa. Obtendríamos la misma respuesta si otorgáramos los signos al revés. El uso de signos positivos y negativos para representar vectores (como el desplazamiento, la velocidad y la aceleración) con sentidos opuestos es una práctica habitual.

b Se ha supuesto que no hay resistencia del aire.

c $e = ut + \frac{1}{2}at^2$
$e = (20{,}5 \times 3{,}05) + \left(\frac{1}{2} \times -9{,}81 \times 3{,}05^2\right)$
$e = 16{,}9\,\text{m}$ por encima del suelo

d $v = u + at$
$v = 20{,}5 + (-9{,}81 \times 3{,}05)$
$v = -9{,}42\,\text{m s}^{-1}$ (moviéndose hacia abajo)

En todas las preguntas siguientes, ignora los posibles efectos de la resistencia del aire. Utiliza $g = 9{,}81\,\text{m s}^{-2}$.

22 Sugiere posibles motivos por los que la aceleración debida a la gravedad no es la misma en todos los puntos de la superficie terrestre.

23 **a** ¿Cuánto tarda en alcanzar el suelo una piedra que se deja caer desde un estado de reposo a una altura de 2,1 m?
b Si lanzamos la piedra hacia el suelo con una velocidad inicial de $4{,}4\,\text{m s}^{-1}$, ¿con qué velocidad impactará contra el suelo?
c Si lanzamos la piedra verticalmente hacia arriba con una velocidad inicial de $4{,}4\,\text{m s}^{-1}$, ¿con qué velocidad impactará contra el suelo?

24 Lanzamos una roca de pequeño tamaño verticalmente hacia arriba con una velocidad inicial de $22\,\text{m s}^{-1}$. ¿Cuándo tendrá una velocidad de $10\,\text{m s}^{-1}$? (Hay dos respuestas posibles).

25 Una pelota que está cayendo tiene una velocidad de $12{,}7\,\text{m s}^{-1}$ cuando pasa por delante de una ventana que está a 4,81 m del suelo. ¿Cuándo impactará la pelota contra el suelo?

26 Lanzamos una pelota verticalmente hacia arriba con una rapidez de $18{,}5\,\text{m s}^{-1}$ desde una ventana que se encuentra a 12,5 m del suelo.
a ¿Cuándo volverá a pasar por delante de la misma ventana en su movimiento de caída?
b ¿Con qué rapidez impactará contra el suelo?
c ¿A qué distancia del suelo se encuentra la pelota al cabo de 2 s exactamente?

27 Dejamos caer dos pelotas que están en reposo desde una misma altura. Si dejamos caer la segunda pelota 0,750 s después de la primera, y suponemos que no impacta contra el suelo, ¿a qué distancia se encuentran las dos pelotas:
a al cabo de 3,00 s de haber dejado caer la segunda pelota?
b 2 s más tarde?

28 Se deja caer una piedra en estado de reposo desde una altura de 34 m. Se lanza otra piedra hacia abajo 0,5 s más tarde. Si ambas piedras impactan contra el suelo al mismo tiempo, ¿cuál era la velocidad inicial de la segunda piedra?

29 En el Ejemplo resuelto 3 se proponía una aceleración de 18 m s^{-2} para un coche de Fórmula 1. Se podría decir que el conductor del coche experimenta una «gravedad» de casi 2*g*, y durante el transcurso de una carrera típica el conductor puede llegar a soportar una gravedad de casi 5*g*. Explica qué es lo que entiendes por una «gravedad» de 2*g*.

30 Se deja caer una piedra A en reposo desde un acantilado. Cuando ha caído 5 m, se deja caer la piedra B.
- **a** ¿Cómo cambia la distancia entre ambas piedras (si es que cambia) a medida que caen?
- **b** Razona tu respuesta.

31 **a** Una pulga acelera al increíble promedio de 1500 m s^{-2} durante un despegue vertical que dura solo unos 0,0012 s. ¿Qué altura alcanzará la pulga?
- **b** Mide cuánto puedes saltar verticalmente (desde el mismo sitio) y utiliza el resultado para calcular tu velocidad de despegue.
- **c** Para saltar, has tenido que doblar las rodillas y reducir tu altura. Mide cuánto se ha reducido tu altura justo antes de saltar y a continuación utiliza el resultado para estimar tu aceleración media durante el despegue.
- **d** ¿Cuánto ha durado tu despegue?
- **e** Compara tus datos con los de la pulga.

32 Utiliza Internet para aprender más sobre el proyecto GOCE, que finalizó en 2013 (Figura 2.32).



Figura 2.32
El satélite Explorador del Campo Gravitatorio y de la Circulación Oceánica en estado Estacionario (GOCE por sus siglas en inglés) fue lanzado por la Agencia Espacial Europea en 2009

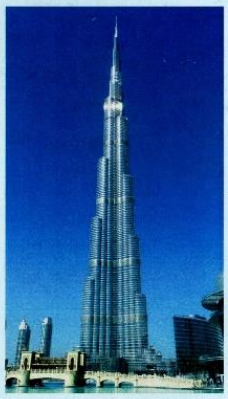


Figura 2.33
Edificio Burj Khalifa (en Dubai)

33 En la Figura 2.33 se muestra el edificio más alto del mundo, el Burj Khalifa, en Dubai.
- **a** ¿Cuánto tardaría un objeto en impactar contra el suelo si se dejara caer desde 828 m (la altura del Burj Khalifa)?
- **b** ¿Con qué velocidad impactaría contra el suelo?

34 Se han medido los tiempos de caída de una pelota desde distintas alturas (Figura 2.31).
- **a** Dibuja esquemáticamente la gráfica altura–tiempo que esperarías obtener a partir de estos resultados.
- **b** Considerando la ecuación $e = ut + \frac{1}{2}at^2$, ¿cuál es la mejor gráfica para obtener la recta de ajuste a partir de la que determinar la aceleración debida a la gravedad?

Resistencia de un fluido y velocidad terminal

Cuando un objeto se mueve a través del aire, este se ve forzado a desplazarse hacia fuera de la trayectoria del objeto. Este fenómeno provoca una fuerza que se opone al movimiento y que se denomina **resistencia del aire** (**resistencia aerodinámica**).

El movimiento de un objeto que se desplaza en cualquier dirección a través de todo gas o líquido está sometido a fuerzas similares de oposición al movimiento. (Tanto los gases como los líquidos se describen como **fluidos** porque pueden **fluir**). Estas fuerzas de oposición al movimiento se suelen denominar **resistencia del fluido**.

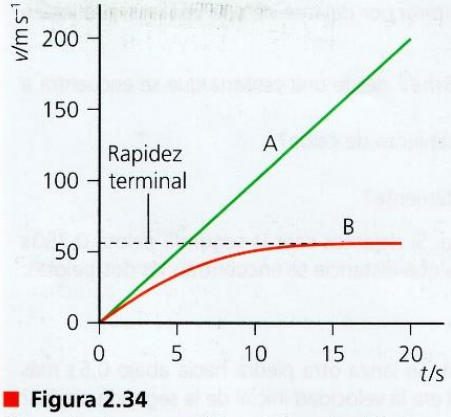


Figura 2.34
Ejemplo de una gráfica de la velocidad respecto al tiempo para un objeto que cae por efecto de la gravedad, con resistencia del aire y sin ella

El movimiento de un objeto que cae hacia la Tierra se representa en la Figura 2.34. La recta A representa el movimiento sin resistencia del aire y la curva B muestra el movimiento teniendo en cuenta la resistencia del aire, una situación más realista.

Cuando un objeto empieza a caer no hay resistencia del aire. La aceleración inicial, *g*, es la misma que si estuviera en el vacío. A medida que aumenta la rapidez de caída del objeto, la resistencia del aire también aumenta, de manera que la tasa de incremento de la velocidad se hace menor. Este fenómeno se ilustra en la Figura 2.34 mediante la pendiente de la curva B, que se hace menos escarpada. Al final, el objeto alcanza una velocidad máxima constante que se denomina **rapidez terminal** o *velocidad terminal* («terminal» significa final). El

valor de la rapidez terminal de un objeto depende de su sección transversal, su forma y su peso, tal como se explica en la Sección 2.2. Se suele considerar que la rapidez terminal de un paracaidista está en torno a 200 km h^{-1} (56 m s^{-1}) – Figura 2.35. La rapidez terminal también depende de la densidad del aire – en octubre de 2012 el paracaidista austríaco Felix Baumgartner (Figura 2.36) estableció el récord mundial de rapidez en 1358 km h^{-1} al saltar desde una altura de unos 39 km sobre la superficie de la Tierra, donde hay muy poco aire.



Figura 2.35
Paracaidistas en caída libre

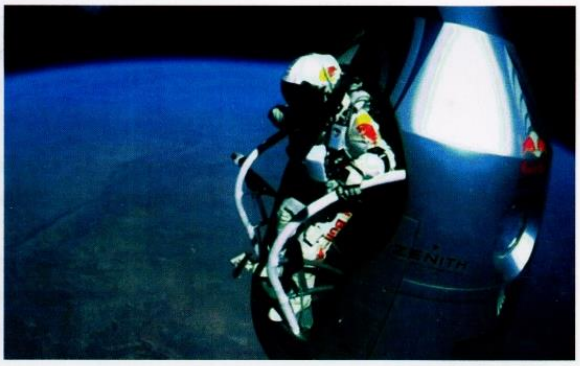


Figura 2.36
Felix Baumgartner a punto de saltar desde una altura de 39 km

El diseño de paracaídas simples y su movimiento permiten realizar interesantes estudios, especialmente si se puede grabar en vídeo su caída cuando esta es casi vertical. El movimiento de un objeto que cae verticalmente a través de un líquido (por ejemplo petróleo) es más lento y también puede estudiarse en un laboratorio escolar. También puede alcanzar una velocidad terminal y presenta un patrón de movimiento análogo al que se muestra en la Figura 2.34. Las simulaciones por ordenador también resultan de utilidad para estimar de forma rápida cuáles son los factores que afectan a la rapidez terminal. La resistencia del aire se estudia con mayor detalle en posteriores apartados de este capítulo (página 52).

Perspectivas adicionales

Galileo

Existe un acuerdo común sobre la idea de que «los objetos más pesados caen a tierra más rápido que los objetos más ligeros». Se puede demostrar fácilmente dejando caer, por ejemplo, una pelota y una hoja de papel, una al lado de la otra. La comprensible idea de que los objetos más pesados caen más rápido constituyó un principio fundamental de la «filosofía natural» (el nombre que recibían los primeros estudios de lo que hoy día conocemos como ciencia) durante más de 2000 años de civilización. En la antigua Grecia, Aristóteles había ligado el movimiento de los objetos en caída libre con la idea de que todo proceso tiene un propósito y que la Tierra es el lugar de reposo natural y legítimo para todo.

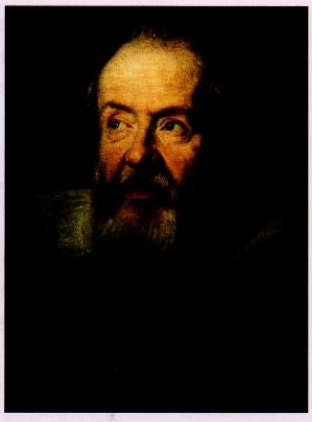


Figura 2.37
Galileo Galilei

En el siglo XVI el científico italiano Galileo (Figura 2.37) fue de los primeros en sugerir que el motivo por el que diversos objetos caen de forma distinta es únicamente la resistencia del aire. Galileo predijo que si el experimento se pudiera repetir en el vacío (sin aire), todos los objetos presentarían exactamente el mismo patrón de movimiento descendente bajo los efectos de la gravedad.

Según se cuenta en una de las anécdotas más famosas de la historia de la ciencia, Galileo dejó caer diferentes masas desde un balcón de la Torre de Pisa (Italia) para demostrar a los que observaban desde el suelo que la gravedad actúa de igual forma sobre todos los objetos que caen. Esta anécdota puede ser cierta o no, pero uno de los motivos por los que Galileo es un científico tan respetado es porque fue uno de los primeros que verdaderamente hicieron experimentos, no solo los idearon.

No fue hasta muchos años más tarde, tras la invención de las primeras bombas de vacío, cuando Isaac Newton, entre otros científicos, pudo eliminar los efectos de la resistencia del aire y demostrar que una moneda (una «guinea») y una pluma llegan al suelo a la vez.

En 1971 se repitió este famoso experimento en la Luna (Figura 2.38), cuando el astronauta David Scott dejó caer un martillo y una pluma, uno al lado de la otra. Millones de espectadores de todo el mundo observaban el experimento mientras Scott les explicaba los descubrimientos de Galileo. La fuerza de la gravedad es menor en la Luna que en la Tierra porque la Luna es más pequeña (tiene menos masa). Los objetos se aceleran hacia la Luna unas 6 veces más lentamente que hacia la Tierra (g = 1,6 m s^{-2}).



Figura 2.38 *Caída libre de objetos en la Luna*

1 Los logros de Galileo se mencionaron específicamente cuando se repitió el experimento en la Luna, pero, ¿piensas que hubo otros científicos que fueron igualmente dignos de reconocimiento por su avanzada forma de comprender el movimiento y la gravedad? Cita el nombre de dos de estos pioneros de la ciencia y enumera sus grandes logros.

Naturaleza de la ciencia

¿Qué es la ciencia?

El científico italiano Galileo Galilei (1564–1642) es famoso por sus innovadores estudios sobre cinemática y caída libre de objetos, además de ser reconocido como uno de los primeros científicos *prácticos* (en el sentido moderno del término). Pero, ¿qué es exactamente la ciencia y qué es lo que la hace distinta de otras actividades humanas?

No es una pregunta fácil de responder en unas pocas palabras, aunque sí que hay algunas importantes características que comparten la mayoría de las actividades científicas:

- La ciencia intenta ver la simplicidad que subyace en la vasta complejidad que nos rodea.
- La ciencia busca los patrones lógicos y las reglas que controlan los acontecimientos.
- La ciencia busca acumular conocimiento y, siempre que sea posible, construir sobre el conocimiento existente para fabricar un marco de conocimiento ilimitado.

Y lo que es más importante, la ciencia se basa en la experimentación y en las pruebas; es decir, la ciencia se basa en los «hechos» que, en el momento presente, se aceptan como «ciertos». Un buen científico nunca proclama que algo debe ser absolutamente «cierto» siempre; de hecho, una de las principales características de la ciencia es la verificación de las teorías existentes de forma constante, generalizada e independiente a través de la experimentación. Ningún hecho ni ninguna teoría pueden demostrarse verdaderos en todo momento y lugar, porque la ciencia a menudo avanza a través de experimentos que intentan rebatir nuevas teorías o el conocimiento previamente existente.

A la pregunta «¿qué es la ciencia?» se suele responder explicando *cómo* trabajan los científicos. Es lo que se conoce como el «método científico», que se puede resumir con los pasos que se enumeran a continuación, aunque cada proceso científico en concreto puede mostrar variaciones respecto a este modelo general:

- Escoge un tema de estudio (por ejemplo, el diseño de pelotas de golf – Figura 2.39).
- Recoge la información disponible sobre el tema escogido (tal vez puedes usar Internet para encontrar información sobre el diseño de pelotas de golf).
- Formula una pregunta apropiada para tu estudio (por ejemplo, ¿viaja más lejos una pelota de golf más grande que otra más pequeña si ambas las lanzamos con el mismo golpe?).
- Utiliza la teoría para predecir lo que crees que va a ocurrir en el estudio (por ejemplo, puedes pensar que una pelota más pequeña presenta menos resistencia al aire y por tanto viajará más lejos).

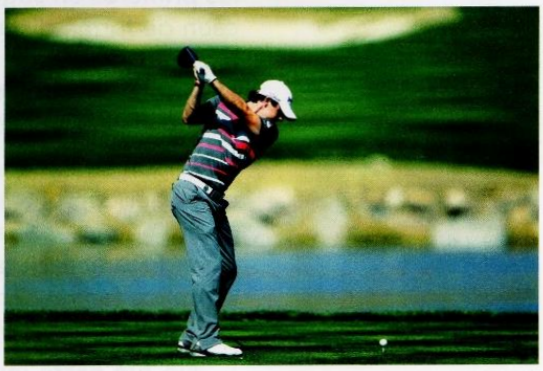


Figura 2.39
¿Por qué tienen las pelotas de golf un tamaño determinado?

- Diseña un experimento para verificar tu predicción y llévalo a cabo.
- Procesa los resultados y evalúa las incertidumbres asociadas.
- Establece unas conclusiones, de modo que aceptes o rechaces tus predicciones.
- Si las conclusiones no son satisfactorias, repite el estudio o vuelve a diseñarlo.
- Si las conclusiones son satisfactorias y los resultados obtenidos se pueden repetir, preséntalos a otras personas.

35 Un antiguo proverbio chino muy conocido afirma: «Escucho y olvido, veo y recuerdo, hago y comprendo». Analiza tu conocimiento de la Física. ¿Hasta qué punto ha mejorado el trabajo experimental tu comprensión? ¿Crees que el hecho de realizar más trabajo experimental (y menos estudio teórico) mejoraría:

a tu interés?
b tus resultados de examen?

Razona tus respuestas.

Movimiento de proyectiles

Cuando hemos estudiado el movimiento de objetos a través del aire, hasta ahora solo hemos considerado el movimiento vertical ascendente o descendente. Ahora vamos a ampliar nuestra perspectiva hasta el movimiento de objetos en *cualquier* dirección. Un **proyectil** es un objeto que ha sido proyectado a través del aire (por ejemplo, disparado, lanzado de algún modo, tirado o golpeado) y que como consecuencia se desplaza únicamente bajo la acción de la fuerza de la gravedad (y la resistencia del aire, si es significativa). Un proyectil no tiene la capacidad de impulsar o de controlar su propio movimiento.

Componentes de la velocidad de un proyectil

La velocidad instantánea de un proyectil en un instante de tiempo cualquiera puede descomponerse en una componente vertical, v_V, y una componente horizontal, v_H, tal como se muestra en la Figura 2.40.

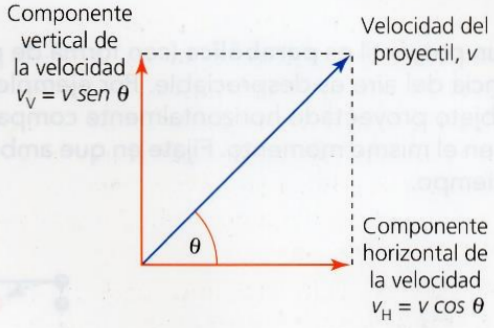


Figura 2.40 *Componente horizontal y componente vertical de la velocidad*

Como estas componentes son perpendiculares entre sí, se pueden tratar de forma independiente (separadamente) en los cálculos.

Cuando no hay resistencia del aire, todos los objetos que se mueven en el aire cerca de la superficie terrestre, bajo la acción del campo gravitatorio uniforme, se aceleran verticalmente hacia abajo con una aceleración de 9,81 m s^{-2} a causa de la fuerza de la gravedad. Esto último es cierto para *todas* las masas y para *todas* las direcciones de movimiento (incluyendo el movimiento ascendente). En otras palabras, cualquier objeto que es proyectado en cualquier ángulo *siempre* se acelera verticalmente hacia abajo con el mismo ritmo que un objeto que se deja caer verticalmente (en ausencia de resistencia del aire).

Los valores de la componente vertical de la velocidad y la velocidad resultante de un proyectil cambian continuamente durante el movimiento como consecuencia de la aceleración debida a la gravedad, pero es importante entender que la componente horizontal se mantiene constante *si* la resistencia del aire es despreciable, porque en este caso no hay fuerzas horizontales actuando sobre el proyectil.

Enlace con la teoría del conocimiento

Intuición

La independencia del movimiento horizontal y vertical en el caso del movimiento de un proyectil parece ir en contra de la intuición. ¿Cómo esquivan la intuición los científicos? ¿Cómo utilizan la intuición?

La **intuición** humana ha desempeñado un papel importante en muchos descubrimientos científicos, y en la evolución científica en general, pero los científicos también necesitan recurrir a la imaginación para proponer teorías que en ocasiones parecen ir en contra del «sentido común».

Esto último es particularmente cierto cuando intentamos comprender el extraño dominio de la física cuántica, donde basarse en las experiencias cotidianas es de poca o nula utilidad. Sin embargo, vale la pena recordar que muchos de los conceptos y teorías comúnmente aceptados de la física clásica que actualmente se enseñan en las escuelas, les habrían resultado altamente improbables a los científicos de la época en que se propusieron por primera vez.

36 En un momento determinado, una pelota de tenis se mueve hacia arriba con una velocidad de $28{,}4\,m\,s^{-1}$ con un ángulo de 15,7° respecto a la horizontal. Calcula la componente horizontal y la componente vertical de la velocidad.

37 Una nave espacial desciende a una velocidad constante de $480\,km\,h^{-1}$ con un ángulo de 2,0° respecto a la horizontal.
- **a** ¿Cuál es el valor de la componente vertical de la velocidad de la nave?
- **b** ¿Cuánto tardará en descender 500 m sobre su trayectoria de vuelo? (Da la respuesta con una aproximación de un minuto).

38 Se proyecta una piedra verticalmente hacia arriba con un ángulo de 22° respecto a la vertical. ¿En qué momento la componente vertical de la velocidad tiene un valor de $38\,m\,s^{-1}$?
- **a** ¿Cuál es el valor de la componente horizontal de la velocidad en ese momento?
- **b** Al cabo de otro segundo,
  - **i** la componente horizontal
  - **ii** la componente vertical

  ¿será mayor, menor o igual que antes? (Ignora los efectos de la resistencia del aire).

Trayectoria parabólica

En la Figura 2.41 se muestra la *fotografía estroboscópica* del rebote de una pelota. En una fotografía estroboscópica los intervalos de tiempo entre las distintas posiciones de la pelota son siempre iguales.

La **trayectoria** habitual de un proyectil es **parabólica** (con forma de parábola o de fragmento de parábola) cuando la resistencia del aire es despreciable. Por ejemplo, en la Figura 2.42 se representa la trayectoria de un objeto proyectado horizontalmente comparada con la de un objeto que se deja caer verticalmente en el mismo momento. Fíjate en que ambos objetos caen la misma distancia vertical en el mismo tiempo.

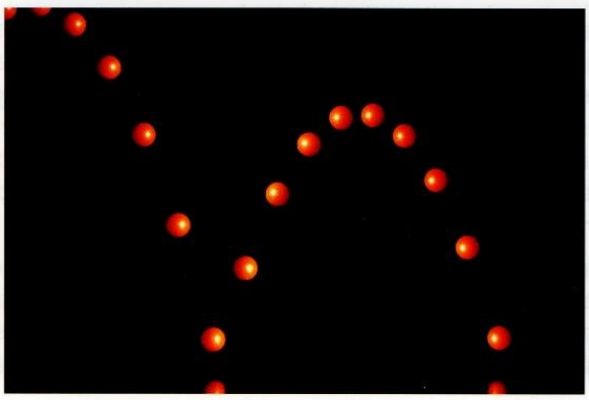


Figura 2.41
Trayectoria parabólica del rebote de una pelota

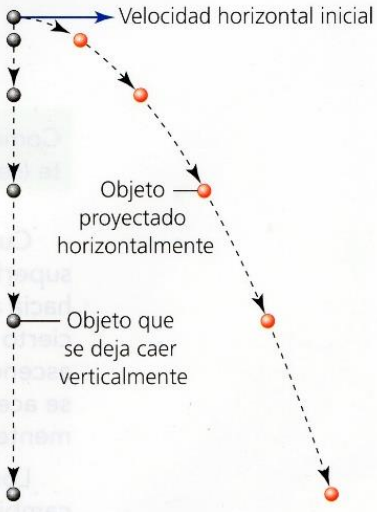


Figura 2.42
Trayectoria parabólica de un objeto proyectado horizontalmente comparada con la de un objeto que se deja caer verticalmente

La distancia y el tiempo recorridos por los diversos proyectiles ha sido objeto tradicional de estudio científico y ha producido interesantes resultados. La grabación en vídeo y el posterior análisis de los registros facilita mucho la realización de este tipo de estudios, así como su exactitud. Existen asimismo numerosas simulaciones por ordenador que permiten a los estudiantes comparar rápidamente diversas trayectorias correspondientes a distintas condiciones.

Aplicaciones

Balística

El estudio de la utilización de los proyectiles se denomina *balística*. Los estrechos vínculos con la caza y con los enfrentamientos armados hacen de la balística un área de la ciencia con una larga historia que se remonta tan atrás como las jabalinas o los arcos y las flechas. En la época medieval existía una confusión muy común respecto al movimiento de las balas de cañón (Figura 2.43): se creía que se desplazaban en línea recta hasta que se quedaban sin energía.

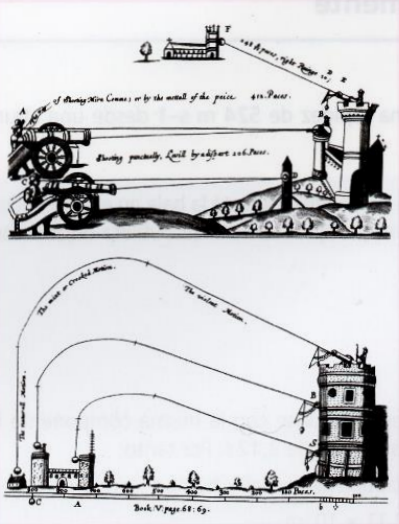


Figura 2.43
Las trayectorias de las balas de los cañones eran objeto habitual de confusión



Figura 2.44
Una bala «congelada» mediante una fotografía de alta velocidad

En el siglo XIX, la aparición de las fotografías de sucesión rápida se convirtió en una útil herramienta para el análisis de diversos tipos de movimiento, pero las trayectorias de movimiento muy rápido (como las de los proyectiles) fueron difíciles de comprender hasta que se pudieron filmar o bien iluminar con haces de luz muy rápidos (estroboscopios). La obtención de la fotografía de una bala disparada con un arma como la que se muestra en la Figura 2.44 requiere el uso de alta tecnología, como un flash de alta velocidad y grabadores de imagen muy sensibles, con el objetivo de «congelar» el proyectil (la bala) en movimiento rápido (más de 500 m s^{-1}).

Utiliza Internet para descubrir la obra de Eadweard Muybridge.

Efectos de la resistencia del aire

En la práctica, ignorar los efectos de la resistencia del aire puede ser poco realista, especialmente en el caso de objetos pequeños y/o objetos que se mueven con rapidez. Por tanto, es importante comprender (aunque solo sea en líneas generales) cómo afecta la resistencia del aire al movimiento de los proyectiles.

La *resistencia del aire (resistencia aerodinámica)* produce una fuerza que se opone al movimiento. Sin resistencia del aire asumimos que la componente horizontal de la velocidad del proyectil es constante, pero con resistencia del aire esta componente decrece. Sin resistencia del aire, el movimiento vertical siempre tiene una aceleración hacia abajo de 9,81 m s^{-2}, pero con resistencia del aire esta aceleración se reduce para los objetos que caen y la deceleración aumenta para los objetos que suben.

En la Figura 2.45 se muestran las trayectorias habituales con resistencia del aire y sin ella. Observa que con resistencia del aire la trayectoria ya no es ni parabólica ni simétrica.

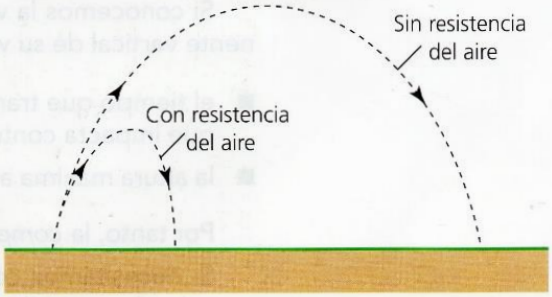


Figura 2.45
Efecto de la resistencia del aire sobre la trayectoria de un proyectil

Cálculo del movimiento de un proyectil

Si se conoce la velocidad (en valor numérico y en dirección) en cada momento de un proyectil cualquiera que se desplaza por el aire, se pueden utilizar las ecuaciones de movimiento para

determinar la velocidad del objeto en cualquier momento durante su trayectoria. *Para efectuar cualquiera de estos cálculos debemos suponer que no hay resistencia del aire y que la aceleración hacia abajo debida a la gravedad tiene siempre el valor 9,81 m s^{-2}.*

La transformación de energía potencial gravitatoria (mgh) en energía cinética ($\frac{1}{2}mv^2$) permite en ocasiones resolver el problema de otra forma; si igualamos las expresiones de ambas energías, podemos ver que para una masa en reposo que cae por una altura vertical cercana a la superficie de la Tierra:

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2$$

o bien

$$v = \sqrt{2gh}$$

Objetos proyectados horizontalmente

Ejemplo resuelto

8 Se dispara una bala horizontalmente con una rapidez de 524 m s–1 desde una altura de 22,0 m sobre el suelo. Calcula cuándo impactará contra el suelo.

En primer lugar necesitamos calcular durante cuánto tiempo está la bala en el aire. Podemos hacerlo considerando cuánto tiempo habría tardado la misma bala en caer al suelo si se hubiera dejado caer verticalmente desde un estado de reposo (por tanto, $u = 0$):

$$e = ut + at^2$$
$$22{,}0 = \frac{1}{2} \times 9{,}81 \times t^2$$
$$t = 2{,}12\,\text{s}$$

Sin resistencia del aire la bala continuará desplazándose con la misma componente horizontal de la velocidad (524 m s^{-1}) hasta que impacte contra el suelo al cabo de 2,12 s. Por tanto:

distancia horizontal recorrida = velocidad horizontal × tiempo

distancia horizontal = 524 × 2,12 = 1,11 × 10^3 m

39 Copia la Figura 2.45 y añádele las trayectorias de un objeto proyectado en la misma dirección con:
- **a** velocidad inicial menor
- **b** velocidad inicial mayor.

40 **a** Utiliza una hoja de cálculo para calcular los desplazamientos verticales y horizontales (cada 0,2 s) de una piedra lanzada horizontalmente desde un acantilado (con una altitud de 48 m) con una velocidad inicial de 25 m s^{-1}. Continúa los cálculos hasta que impacte contra el suelo.
b Dibuja una gráfica de la trayectoria de la piedra.

41 Se dispara un rifle horizontalmente hacia el centro de un blanco que está a 52,0 m.
- **a** Si la bala lleva una velocidad inicial de 312 m s^{-1}, ¿cuánto tiempo tardará en alcanzar el blanco?
- **b** ¿A qué distancia del centro del blanco impactará la bala?

Objetos proyectados en otros ángulos

La física es la misma para todos los proyectiles y todos los ángulos: la trayectoria sigue siendo parabólica y las componentes horizontal y vertical siguen siendo independientes entre sí. Sin embargo, las matemáticas sí son más complejas cuando el movimiento inicial no es ni horizontal ni vertical.

Los problemas más habituales son los relativos a encontrar la altura máxima y la distancia horizontal máxima (**alcance**) del proyectil.

Si conocemos la velocidad y la posición de un proyectil siempre podemos utilizar la componente vertical de su velocidad para determinar:

- el tiempo que transcurre hasta que alcanza su altura máxima y el tiempo que transcurre hasta que impacta contra el suelo
- la altura máxima alcanzada (suponiendo que su velocidad tiene una componente hacia arriba).

Por tanto, la *componente horizontal* puede utilizarse para determinar el alcance.

Si necesitamos conocer la velocidad en un instante de tiempo determinado, por ejemplo cuando el proyectil impacta contra el suelo, debemos combinar las componentes vertical y horizontal con objeto de determinar la resultante tanto en módulo como en dirección.

Ejemplo resuelto

9 Lanzamos una piedra hacia arriba desde una altura de 1,60 m sobre el suelo con una rapidez de 18,0 $m\,s^{-1}$ y un ángulo de 52,0° respecto a la horizontal. Si asumimos que la resistencia del aire es despreciable, calcula:

a la altura máxima que alcanza la piedra

b la componente vertical de la velocidad cuando impacta contra el suelo

c el tiempo que tarda en alcanzar el suelo

d la distancia horizontal hasta el punto donde impacta contra el suelo

e la velocidad de impacto.

En primer lugar necesitamos conocer las dos componentes de la velocidad inicial:

$u_V = u \operatorname{sen} \theta = 18{,}0 \operatorname{sen} 52{,}0° = 14{,}2\ m\,s^{-1}$

$u_H = u \cos \theta = 18{,}0 \cos 52{,}0° = 11{,}1\ m\,s^{-1}$

a Si utilizamos $v^2 = u^2 + 2ae$ para el movimiento vertical ascendente (considerando que el sentido ascendente es positivo) y recordamos que en la altura máxima $v = 0$, obtenemos:

$0 = 14{,}2^2 + [2 \times (-9{,}81) \times e]$

$e = +10{,}3$ m sobre el punto desde el que fue lanzada la piedra; una altura total de 11,9 m.

(El uso de $\frac{1}{2}v^2 = gh$ es una forma alternativa de efectuar el mismo cálculo).

b Si utilizamos $v^2 = u^2 + 2ae$ para el movimiento total obtenemos:

$v^2 = 14{,}2^2 + [2 \times (-9{,}81) \times (-1{,}60)]$

$v = 15{,}3\ m\,s^{-1}$ hacia abajo

c Si utilizamos $v = u + at$ obtenemos:

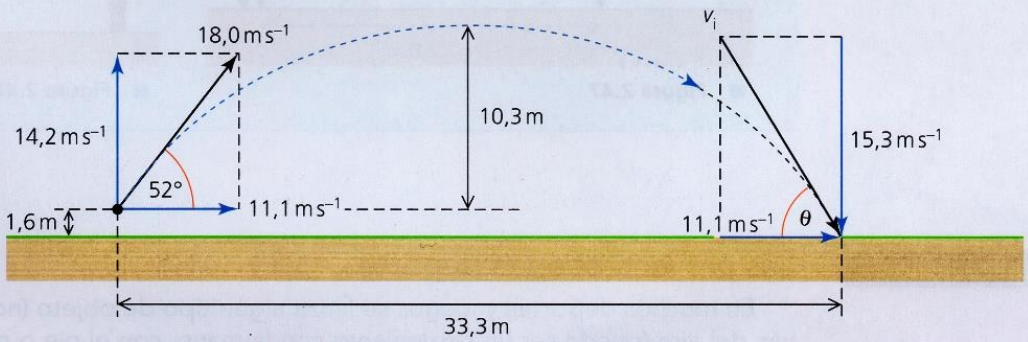
$-15{,}3 = 14{,}2 + (-9{,}81)t$

$t = 3{,}0$ s

d Si utilizamos $e = vt$ con la componente horizontal de la velocidad obtenemos:

$e = 11{,}1 \times 3{,}0 = 33{,}3$ m

e En la Figura 2.46 se ilustra la información que hemos determinado hasta ahora y el ángulo y la velocidad desconocidos.



■ **Figura 2.46**

A la vista del diagrama, podemos utilizar el teorema de Pitágoras para calcular la velocidad de impacto:

(velocidad de impacto)^2 = (componente horizontal)^2 + (componente vertical)^2

$v_i^2 = 11{,}1^2 + 15{,}3^2$

$v_i = 18{,}9\ m\,s^{-1}$

Podemos determinar el ángulo de impacto respecto a la horizontal, θ, utilizando trigonometría:

$\operatorname{tg} \theta = \frac{15.3}{11{,}1}$

$\theta = 54{,}0°$

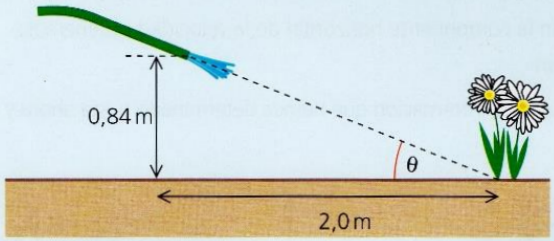
42 Repite el ejercicio del Ejemplo resuelto 9 para una piedra lanzada desde la cima de un acantilado con una velocidad inicial de $26\,m\,s^{-1}$ y un ángulo de 38° respecto a la horizontal. El punto de lanzamiento se encuentra a una altitud de 33 m.

43 El alcance máximo de un proyectil tiene lugar cuando se proyecta a un ángulo de 45 respecto al suelo (una vez más, ignora los efectos de la resistencia del aire). Calcula la distancia máxima que recorrerá una pelota de golf antes de impactar contra el suelo si su velocidad inicial es $72\,m\,s^{-1}$. (Como necesitas suponer que no hay resistencia del aire, el alcance que calcularás será muy superior al que obtienen los mejores golfistas profesionales.)

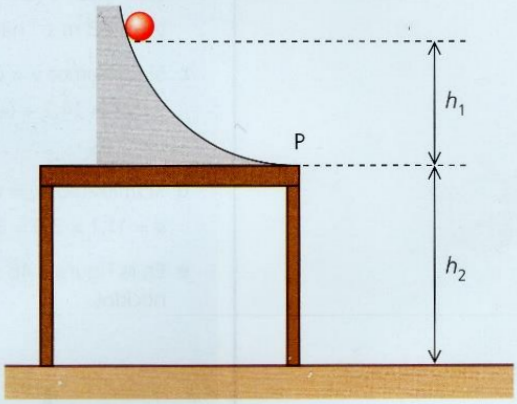
44 Un chorro de agua procedente de una manguera se dirige a la base de una flor, tal como se muestra en la Figura 2.47. El agua sale de la manguera con una velocidad de $3{,}8\ m\ s^{-1}$.
- **a** Calcula el ángulo, θ, y las componentes vertical y horizontal de la velocidad inicial del agua.
- **b** ¿A qué distancia de la base de la planta impacta el agua contra el suelo?

45 Una bola rueda por la pendiente representada en la Figura 2.48 y a continuación es proyectada horizontalmente fuera de la superficie de la mesa en el punto P.
- **a** Demuestra que el alcance máximo de la bola viene dado por la expresión $R = 2\sqrt{h_1 h_2}$. (Ignora los efectos debidos a la rotación de la bola).
- **b** ¿Qué supuesto(s) has tenido en cuenta?
- **c** Explica por qué tu respuesta para el apartado **a** no depende de la masa de la bola.

46 Si la distancia máxima a la que una persona puede lanzar una bola es 78 m, ¿cuál es la rapidez mínima con la que se suelta la bola? (Supón que la bola toca el suelo a la misma altura desde la que fue lanzada y que el alcance máximo para una rapidez dada se produce cuando el ángulo es 45°.)



■ **Figura 2.47**

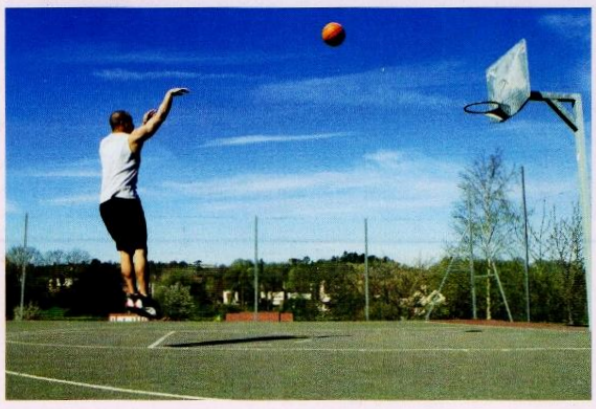


■ **Figura 2.48**

Aplicaciones

Los proyectiles en el deporte

En muchos deportes y juegos se lanza algún tipo de objeto (normalmente una pelota) a través del aire (puede ser un lanzamiento con la mano, con el pie o con otro objeto). Los ejemplos más conocidos son el baloncesto (véase la Figura 2.49), el tenis, el fútbol, el bádminton, el tiro con arco, el críquet y el golf. La habilidad de los jugadores consiste en hacer que la pelota (u otro objeto cualquiera) se mueva con la rapidez y la trayectoria adecuadas; además, el jugador también tiene que ser capaz de juzgar correctamente la trayectoria de un objeto que se mueve hacia él.



■ **Figura 2.49**
Una pelota de baloncesto se mueve describiendo aproximadamente una parábola

La masa, la forma, el diámetro y la naturaleza de la superficie de la pelota afectan al modo en que se desplaza a través del aire una vez ha sido «proyectada». Aunque en la mayoría de los deportes podemos suponer que la pelota seguirá una trayectoria a través del aire aproximadamente parabólica, si la pelota siempre siguiera una trayectoria perfectamente parabólica el juego sería predecible y la destreza del jugador cobraría menos importancia. El efecto del aire moviéndose sobre la superficie de la pelota desempeña un importante papel en muchos deportes y los buenos jugadores lo aprovechan haciendo girar la pelota sobre sí misma (rotar). La presión del aire es distinta en los lados opuestos de una pelota que gira, lo que produce una fuerza que afecta a la dirección del movimiento.



Figura 2.50
Las trayectorias de un volante de bádminton no son parabólicas

La diversión que experimentamos cuando practicamos u observamos un deporte proviene en parte de ver que la pelota que lanzamos o golpeamos se desplaza con la rapidez y la precisión adecuadas, además de recorrer una gran distancia. Es interesante considerar cómo ha evolucionado el diseño de las pelotas en diferentes deportes.

El bádminton es un deporte poco corriente porque el diseño del volante (también llamado pluma o gallito) produce deliberadamente trayectorias no parabólicas (véase Figura 2.50). El volante tiene una masa pequeña con respecto a su sección transversal, lo que significa que puede viajar muy rápido cuando se golpea por primera vez; después, la resistencia del aire tiene un efecto significativo, que se traduce en la reducción del alcance. La mayor parte de la masa del volante se encuentra concentrada en el «corcho», en el extremo opuesto de las plumas, de manera que el movimiento del volante en el aire está dirigido por el corcho.

1 ¿En qué deporte recorre una mayor distancia la pelota golpeada? Investiga si en ese deporte existe alguna regla que intente limitar la máxima distancia que puede recorrer la pelota.

2 Si dejáramos caer desde una misma altura y sobre una misma superficie dura diversas pelotas correspondientes a distintos juegos, ¿cuál de ellas rebotaría hasta una mayor altura? Explica los motivos por los que esa pelota en concreto pierde la menor fracción de su energía cuando colisiona con la superficie y por qué tiene importancia para el deporte en el que se utiliza.

3 Investiga cómo puede afectar el giro de la pelota sobre sí misma (rotación) a la dirección de la pelota.

2.2 Fuerzas

En física clásica es necesaria la acción de una fuerza para cambiar un estado de movimiento, tal como sugiere Newton en sus leyes del movimiento

Para decirlo de la forma más simple, una fuerza empuja o tira. Cuando una fuerza actúa sobre un objeto (un *cuerpo*) puede hacer que se mueva (Figura 2.51) o bien puede cambiar su movimiento si el objeto ya se está moviendo. En otras palabras, una fuerza puede cambiar la velocidad de un objeto; las aceleraciones están causadas por fuerzas.

Las fuerzas también pueden cambiar la forma de un objeto. Es decir, una fuerza puede hacer que un objeto se deforme de algún modo. Por ejemplo, cuando nos sentamos sobre una silla blanda la **deformación** es fácil de ver. Sin embargo, cuando nos sentamos sobre una silla dura o sobre el suelo, sigue habiendo una deformación pero habitualmente es demasiado pequeña para que se vea.



Figura 2.51
La fuerza ascendente que actúa sobre un cohete lo acelera hacia el espacio exterior

El efecto de una fuerza depende claramente de la dirección sobre la que actúa. La fuerza es una magnitud *vectorial*. Como cualquier vector, una fuerza puede ser representada mediante el dibujo de un segmento con la longitud adecuada y en la dirección y sentido correctos (indicados mediante una flecha) desde el *punto de aplicación* o hacia este. La flecha que representa el vector debe ir correctamente etiquetada con un nombre o un símbolo aceptado. La longitud del segmento debe ser *proporcional* al módulo de la fuerza. Por ejemplo, las flechas de la Figura 2.52 representan los distintos pesos de dos personas.

Cuando decimos que las fuerzas actúan sobre un objeto podemos emplear indistintamente las expresiones *aplicar* una fuerza a un objeto o *ejercer* una fuerza sobre un objeto.

El símbolo que se utiliza para representar la fuerza es ***F*** y la unidad del SI para la fuerza es el **newton**, N. Se define 1 newton como la fuerza (resultante) que hace que una masa de 1 kg se acelere $1\,m\,s^{-2}$.

Los objetos como partículas puntuales

En situaciones simples, cuando se aplica una fuerza sobre un objeto, su forma y su tamaño no suelen tener demasiada importancia y el hecho de añadir detalles a su representación gráfica puede llevar a confusión. Nos podríamos preguntar, por ejemplo, si un objeto que hemos dibujado con un cierto tamaño rota o se inclina cuando actúa una fuerza sobre él. Véase la Figura 2.61 como ejemplo. Por este motivo y también por simplicidad, los objetos se suelen representar como puntos – **partículas puntuales**.

Distintos tipos de fuerzas

Además de las fuerzas que tiran de algo o que lo empujan, las más habituales en la vida diaria, estamos rodeados de numerosos tipos de fuerzas. En el apartado siguiente introduciremos y explicaremos brevemente estos tipos de fuerzas:

- peso
- tensión y compresión
- fuerzas de reacción
- fricción y resistencia del aire
- empuje
- otras fuerzas en las que no hay contacto (como el peso)

Peso

El **peso**, *P*, de una masa es la **fuerza gravitatoria** que tira de ella hacia el centro de la Tierra. El peso y la masa están relacionados mediante la ecuación:

$$P = mg$$

En esta ecuación, *P* es el peso en newtons, *m* es la masa del objeto en kilogramos y *g* es la aceleración debida a la gravedad en metros por segundo al cuadrado ($m\,s^{-2}$). Cuanto mayor es la masa del objeto, mayor es su peso.

Una interpretación alternativa de *g* es como cociente entre el peso y la masa, $g = P/m$. Si la expresamos así, *g* se conoce como **intensidad del campo gravitatorio**, con la unidad newtons por kilogramo $N\,kg^{-1}$ ($1\,N\,kg^{-1} = 1\,m\,s^{-2}$). Una masa determinada pesa menos en la Luna que en la Tierra porque nuestro satélite tiene una menor intensidad del campo gravitatorio.

El valor aceptado de *g* sobre la superficie terrestre o cerca de esta es $9{,}81\ m\ s^{-2}$, aunque puede variar ligeramente según la ubicación, como vimos en la Tabla 2.1. Para cálculos rápidos se suele utilizar el valor $g = 10\ m\ s^{-2}$, una aproximación que representa solo un 2% de diferencia. El valor de *g* disminuye a medida que aumenta la distancia respecto al centro de la Tierra. Por ejemplo, a una altura de 300 km sobre la superficie terrestre el valor de *g* ha disminuido ligeramente hasta $9{,}67\ m\ s^{-2}$. Esto significa que los objetos que están a esa altura, como los satélites o los astronautas que orbitan alrededor de la Tierra, no son ingrávidos (como se suele creer), sino que pesan solo algo menos que sobre la superficie de la Tierra.

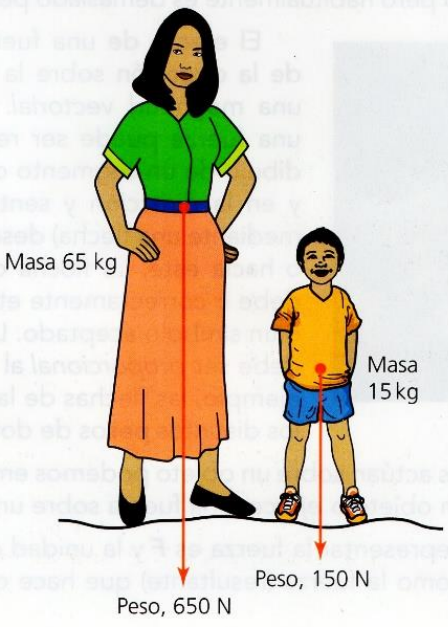


Figura 2.52
El peso actúa hacia abajo desde el centro de masas

Si queremos representar el peso de un objeto mediante un diagrama, utilizamos una flecha con la longitud apropiada y que apunta verticalmente hacia abajo desde el **centro de masas** del objeto, tal como se muestra en la Figura 2.52. Se puede considerar que el centro de masas representa la posición «media» de toda la masa del objeto. En los objetos simétricos y uniformes el centro de masas coincide con el centro geométrico.

La masa de un objeto es siempre la misma con independencia del lugar del universo donde se encuentre, pero la fuerza gravitatoria que actúa sobre el objeto (su peso) varía en función de su ubicación. Por ejemplo, la aceleración debida a la gravedad (intensidad del campo

gravitatorio) sobre la Luna es de 1,6 m s^{-2} y sobre Marte es de 3,7 m s^{-2}. La aceleración debida a la gravedad es distinta sobre la Luna o sobre Marte porque ambos tienen masas y tamaños distintos en comparación con la Tierra. En el espacio profundo, a una distancia muy grande de cualquier estrella o planeta, un objeto cualquiera sería (casi) ingrávido.

Desafortunadamente, en el lenguaje cotidiano la palabra «peso» se utiliza erróneamente para hacer referencia a la masa de un objeto, por ejemplo en kg (no el peso en N), y a la pregunta «¿cuánto pesa tal objeto?» se suele responder en kilogramos y no en newtons. Se trata de una confusión muy habitual con la que todo estudiante o profesor de física se tiene que enfrentar en algún momento.

Ejemplo resuelto

10 Un astronauta tiene una masa de 62,2 kg. ¿Cuál sería su peso en las ubicaciones siguientes?
- **a** sobre la superficie de la Tierra
- **b** en un satélite a 300 km de la Tierra
- **c** en la Luna
- **d** en Marte
- **e** muy lejos de cualquier planeta o estrella

a $P = mg = 62{,}2 \times 9{,}81 = 610\,\text{N}$
b $P = 62{,}2 \times 9{,}67 = 601\,\text{N}$
c $P = 62{,}2 \times 1{,}6 = 100\,\text{N}$
d $P = 62{,}2 \times 3{,}7 = 230\,\text{N}$
e cero

47 Calcula el peso de los objetos siguientes sobre la superficie terrestre:
- **a** un coche de masa 1250 kg
- **b** un recién nacido de masa 3240 g
- **c** un alfiler de un montón de 500 alfileres que tiene una masa total de 124 g.

48 Una chica tiene una masa de 45,9 kg. Utiliza los datos de la Tabla 2.1 para calcular la diferencia entre su peso en Bangkok y su peso en Londres.

49 **a** Se dice que «un avión A380 tiene un peso máximo de despegue de 570 toneladas» (Figura 2.53). Una tonelada equivale a una masa de 1000 kg. ¿Cuál es el peso máximo del avión (en newtons) durante el despegue?
b El avión puede transportar unos 850 pasajeros como máximo. Estima la masa total de los pasajeros más la tripulación. ¿A qué porcentaje de la masa total en el momento del despegue corresponde?
c El peso máximo de aterrizaje es «390 toneladas». Indica un motivo por el que el avión necesita tener menor masa cuando aterriza que cuando despega.
d Calcula la diferencia de masa y explica a dónde ha ido la masa «perdida».



Figura 2.53
El Airbus A380 es el mayor avión de pasajeros del mundo

50 El peso de un objeto disminuye muy ligeramente a medida que aumenta su distancia respecto a la superficie terrestre. Sugiere un motivo por el que no cabe esperar que aumente el peso de un objeto situado en la galería de una mina y por tanto más cerca del centro de la Tierra.

51 Una masa de 50 kg tendría un peso de 445 N sobre el planeta Venus. ¿Cuál es la intensidad del campo gravitatorio en Venus? Compárala con el valor de g sobre la superficie terrestre.

52 Considera dos esferas sólidas construidas con el mismo metal. El radio de la esfera A es el doble del radio de la esfera B. Calcula el cociente de las circunferencias, las áreas superficiales, los volúmenes, las masas y los pesos de ambas esferas.

Aplicaciones

Dinamómetros y balanzas

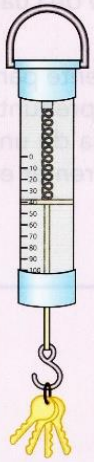


Figura 2.54
Dinamómetro

La manera más fácil de medir una fuerza es a través de los cambios de longitud que produce cuando se estira o se comprime un resorte (o un elemento similar). Los instrumentos que se utilizan para ello se denominan *dinamómetros* (o también *medidores de fuerza con divisiones en newtons* o *balanzas de resorte*) – véase Figura 2.54. En este tipo de instrumentos normalmente el resorte experimenta un cambio de longitud que es proporcional a la fuerza aplicada. La longitud del resorte se representa sobre una escala lineal que puede calibrarse (mediante unas divisiones) en newtons. El resorte vuelve a su forma original una vez se ha medido la fuerza.

Estos instrumentos se pueden utilizar para medir fuerzas que actúan en cualquier dirección, pero también se emplean de forma generalizada para medir pesos. La otra manera habitual de medir pesos es mediante algún tipo de balanza. En la balanza clásica (también conocida como balanza de platillos o balanza de cruz), como la que se muestra en la Figura 2.55, el brazo se mantiene en equilibrio solo si los dos pesos son iguales; es decir, si el peso desconocido es igual al peso conocido.

En este tipo de balanza se puede desplazar el pivote para acercarlo al peso desconocido si este es mucho mayor que el peso (o los pesos) conocido(s). La calibración de la balanza se lleva a cabo mediante el *principio de los momentos*. Este principio no se trata en este curso, pero es posible que a los alumnos les resulte familiar de cursos anteriores.

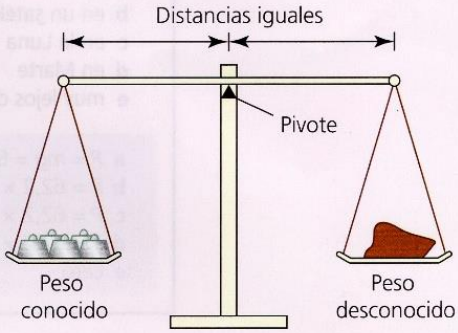


Figura 2.55
Balanza clásica

Para determinar un peso desconocido (N) se puede utilizar cualquiera de los dos métodos anteriores, basados ambos en la fuerza de la gravedad. Sin embargo, estos instrumentos suelen estar calibrados para indicar masa (en kg o en g) más que para indicar peso. El motivo es que normalmente nos interesa más conocer la cantidad de algo que los efectos de la gravedad sobre este algo. Habitualmente suponemos que la masa (kg) = peso (N)/9,81 en cualquier lugar de la Tierra, ya que las variaciones de la aceleración debida a la gravedad, g, son insignificantes para la mayoría de propósitos, aunque no para todos.



Figura 2.56
Un anillo caro

1 Si compraras una determinada cantidad de algo pequeño y caro, como oro o diamantes (Figura 2.56), ¿cómo crees que debería medirse, como masa o como peso? Razona tu respuesta.

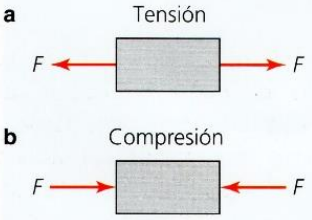


Figura 2.57
Objeto sometido a tensión **a** *y a compresión* **b**

Tensión y compresión

Decimos que un objeto está sometido a **tensión** (Figura 2.57a) cuando está siendo estirado por dos fuerzas iguales y en sentido contrario (opuestas). Las cuerdas o las gomas son ejemplos familiares de objetos sometidos a tensión, pero las *fuerzas de tracción* son muy habituales en objetos más rígidos, como las barras horizontales que se ponen en un taburete o en una silla para apoyar las piernas.

Decimos que un objeto está sometido a **compresión** (Figura 2.57b) cuando está siendo apretado por dos fuerzas iguales y en sentido contrario (opuestas).

Todas las estructuras tienen partes que están sometidas a tensión y partes que están sometidas a compresión. Los pilares de piedra de Stonehenge (Reino Unido) resisten la compresión producida por su propio peso y por el peso de los bloques que descansan sobre ellos (Figura 2.58).

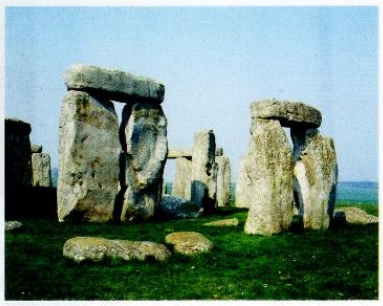


Figura 2.58
Stonehenge fue construido hace unos 4000 años

Los bloques horizontales situados sobre los pilares se curvan *muy* ligeramente, de forma que la superficie superior está sometida a compresión y la superficie inferior está sometida a tensión, lo que puede producir grietas que se extienden hacia arriba. Los mismos principios se aplican a la construcción de todos los edificios modernos, puentes, etc. A modo de ejemplo podemos considerar la Figura 2.59, en la que se representa un esquema de un puente de suspensión con las partes que están sometidas a tensión (T) y a compresión (C). Los estudiantes de física suelen realizar un ejercicio que consiste en la construcción de puentes a escala siguiendo diversos diseños, seguida de la observación y verificación de su resistencia mediante el añadido de pesos cada vez mayores.

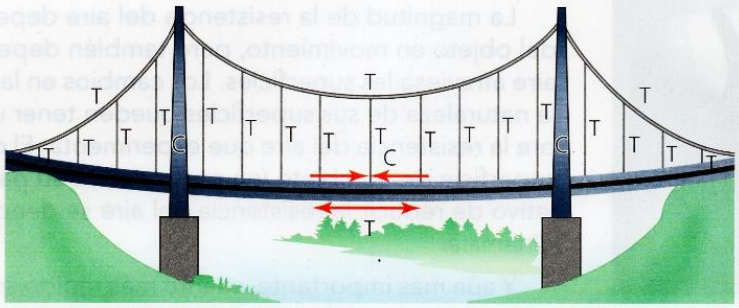


Figura 2.59
Puente de suspensión a escala

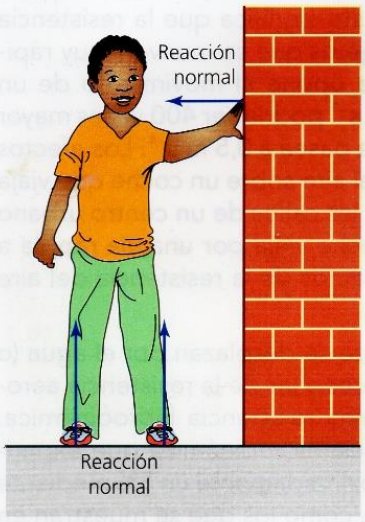


Figura 2.60
Fuerzas de reacción

Fuerzas de reacción

Si dos objetos se tocan (están en *contacto*) cada uno de ellos ejerce una fuerza sobre el otro. Por ejemplo, si empujas una pared, la pared también te empuja a ti. Cuando estás de pie sobre el suelo, tu peso ejerce una fuerza hacia el suelo y lo empuja hacia abajo, pero el suelo también ejerce una fuerza sobre ti y te empuja hacia arriba. Si no fuera así, penetrarías en la pared o en el suelo.

En la Figura 2.60, el peso del muchacho ejerce una fuerza contra el suelo y su mano también ejerce una fuerza sobre la pared. La fuerza que ejerce la pared sobre la mano del muchacho y la fuerza que ejerce el suelo sobre sus pies son ejemplos de **fuerzas de contacto** (también llamadas *fuerzas de reacción*). Estas fuerzas siempre son perpendiculares a la superficie y este es el motivo por el que a menudo se denominan **fuerzas de reacción normales** (la palabra «normal» en este contexto significa perpendicular).

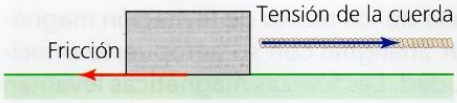


Figura 2.61
Fricción que se opone al movimiento

Fricción sólida

Cuando un objeto se mueve (o intenta moverse) y está en contacto con otra superficie, la fuerza que se ejerce entre ambas superficies actúa de algún modo *oponiéndose* al movimiento (intentando evitarlo). Este tipo de fuerza se denomina **fricción**.

Existen muchos métodos para intentar reducir los efectos de la fricción con el objeto de facilitar el movimiento, pero nunca se puede vencer del todo. La fricción entre dos objetos actúa en dirección paralela a las superficies de ambos y en sentido opuesto al del movimiento (o el intento de movimiento). Esto se muestra en la Figura 2.61, en la que se representa un bloque que está siendo acelerado mediante una cuerda que tira de él y lo arrastra por el suelo.

Sin fricción el movimiento sería muy difícil. Considera cómo caminas por una habitación (Figura 2.62): para dar un paso, el pie ejerce una fuerza sobre el suelo que va hacia atrás y, como consecuencia de la fricción, el suelo ejerce una fuerza sobre el pie que va hacia delante (en el sentido del movimiento). Si no hubiera fricción no se podría caminar y la mayoría de los métodos de transporte no funcionarían.

La fricción se explica con más detalle posteriormente en este mismo capítulo.



Figura 2.62
Necesitamos la fricción para caminar

Resistencia del aire

La **resistencia del aire** (también denominada **resistencia aerodinámica**) es también una fuerza que se opone al movimiento. Un objeto que se mueve a través del aire tiene que desplazar el aire de su trayectoria, lo que produce una fuerza en sentido opuesto al del movimiento.

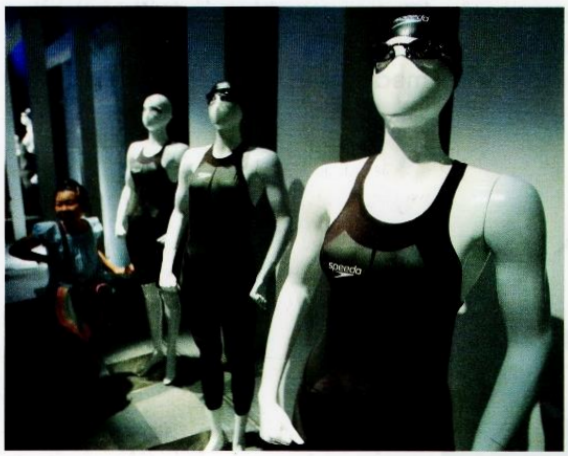


Figura 2.63
El traje de baño LZR Racer se ha diseñado utilizando tecnología de la NASA



Figura 2.64
Tren de levitación magnética de Shanghái

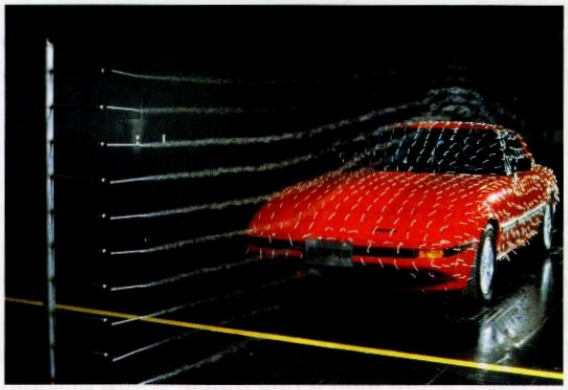


Figura 2.65
Prueba en un túnel de viento

El análisis de los factores que afectan a la resistencia del aire es de gran importancia cuando se estudian objetos en caída libre, paracaídas y todo tipo de medios de transporte (en especial los vehículos que se mueven a gran velocidad). Además, tiene interesantes aplicaciones en el mundo del deporte.

La magnitud de la resistencia del aire depende del área transversal del objeto en movimiento, pero también depende del modo en que el aire atraviesa las superficies. Los cambios en la forma de un objeto o en la naturaleza de sus superficies pueden tener un importante efecto sobre la resistencia del aire que experimenta. El cambio de la forma y/o la superficie de un objeto (en particular de su parte delantera) con el objetivo de reducir la resistencia del aire se denomina *optimización aerodinámica*.

Y aún más importante, cuanto más rápido se mueve un objeto mayor es la resistencia del aire que se opone a este movimiento. Habitualmente se considera que la resistencia del aire para un objeto dado es proporcional a su velocidad *al cuadrado*. Esto significa que la resistencia del aire cobra *mucha* importancia en objetos que se mueven muy rápidamente. La resistencia del aire que se opone al movimiento de un velocista de 100 m lisos que corre a 10 m s^{-1} podría ser 400 veces mayor que la que experimenta una persona que pasea a 0,5 m s^{-1}. Los efectos de frenado que produce la resistencia del aire sobre un coche que viaja a una velocidad media de 30 km h^{-1} por las calles de un centro urbano son mucho menores que si el mismo coche viaja por una vía rápida a 110 km h^{-1} (en este segundo caso los efectos de la resistencia del aire son 13 veces mayores que en el primero).

En el caso de personas o animales que se desplazan por el agua (o sobre ella) se pueden aplicar ideas similares a las de la resistencia aerodinámica, pero en este caso se denomina resistencia hidrodinámica. Por ejemplo, la magnitud de la resistencia hidrodinámica que experimenta un nadador se puede reducir aproximadamente un 5% mediante el uso de trajes de baño hidrodinámicos, como los que se muestran en la Figura 2.63. Por descontado, es muy importante que el traje de baño no afecte de ningún modo al movimiento del nadador y que su peso sea insignificante.

En la Figura 2.64 se muestra uno de los trenes de levitación magnética (tipo «maglev») que conectan Shanghái con su aeropuerto principal, situado a unos 30 km de la ciudad. Las fuerzas magnéticas levantan el tren por encima de la superficie de la vía para eliminar la fricción y la forma optimizada del tren está diseñada para reducir la resistencia del aire. El tren recorre el trayecto en unos 7 minutos y alcanza una velocidad máxima de unos 430 km h^{-1}, aunque en pruebas de velocidad puede superar los 500 km h^{-1}.

El efecto de la resistencia del aire sobre los distintos objetos se suele evaluar en los llamados «túneles de viento» (Figura 2.65). En estos túneles no es el coche el que se mueve respecto al aire en reposo, sino que se lanza sobre el coche una ráfaga de aire a gran velocidad.

Aplicaciones

Viajes en avión

Los aviones consumen grandes cantidades de combustible para desplazar personas y bienes de un lugar a otro rápidamente, pero poco a poco todos vamos tomando conciencia de los efectos de los viajes en avión sobre el calentamiento global y la contaminación del aire. Algunas personas piensan que los gobiernos deberían penalizar con más impuestos los viajes en avión con el objetivo de disuadir a la gente de utilizar en exceso este medio de transporte. El perfeccionamiento de los medios de transporte ferroviarios, especialmente los trenes de alta velocidad, también atraería a más viajeros en detrimento de los viajes en avión. Los ingenieros, evidentemente, intentar construir aviones más eficientes que consuman menos combustible, pero las leyes de la física son las que son y no se pueden violar. La eficiencia de los motores de propulsión que se construyen en la actualidad, como la de todos los demás motores térmicos, ha llegado a su límite superior.

Los aviones consumen menos combustible si la resistencia del aire que actúa sobre ellos es también menor. El diseño de aviones con optimización aerodinámica y los viajes a mayor altura, donde el aire es menos denso, permiten disminuir la resistencia del aire y por tanto el consumo. Disminuir la velocidad del vuelo también puede reducir la cantidad de combustible que se consume, como ocurre con los coches, pero en general los viajeros desean que los viajes duren lo menos posible.

La presión del aire en el exterior de un avión que se desplaza a su velocidad de crucero habitual es demasiado baja para la comodidad y la salud de los pasajeros y de la tripulación. Por tanto, la presión en el interior del avión tiene que ser aumentada, aunque los valores que alcanza siguen siendo mucho más bajos que los de la presión del aire cerca de la superficie terrestre. La diferencia entre la presión exterior e interior del avión podría causar graves problemas si el avión no estuviera diseñado adecuadamente para soportar las fuerzas adicionales.

Los aviones transportan normalmente una gran masa de combustible, y el peso del avión disminuye durante el trayecto a medida que el combustible se va consumiendo. La fuerza en sentido ascendente que soporta el peso de un avión volando proviene del aire que está siendo desplazado y varía con la velocidad y con la densidad del aire. Cuando el avión está cerca del final del trayecto puede volar a mayor altura, donde experimenta una menor resistencia del aire.

1 **a** Averigua cuánto combustible se consume en un vuelo de larga distancia, por ejemplo de 12 horas.

b Compara la respuesta anterior con la capacidad de un depósito de combustible de un coche de tamaño medio.

c En un vuelo de corta distancia hasta el 50% del combustible del avión se emplea en rodar por la pista, despegar, ascender y aterrizar, pero en los vuelos de larga distancia este porcentaje se puede reducir hasta menos del 15%. Razona esta diferencia de porcentajes

2 ¿Estás de acuerdo en que debería reducirse de algún modo el número de viajes en avión? ¿Están de acuerdo contigo los demás miembros de tu grupo? ¿Crees que el gobierno tiene el derecho o la obligación de intentar cambiar las costumbres de la gente mediante la penalización con impuestos? (Los impuestos que gravan el alcohol o el tabaco son ejemplos similares).

Empuje

El empuje es una fuerza que se ejerce verticalmente hacia arriba sobre *cualquier* objeto que se encuentre sobre o en un fluido (ya sea un gas o un líquido). Esta fuerza surge porque la presión del fluido sobre la parte inferior del objeto es mayor que la presión sobre su parte superior. El empuje actúa en sentido opuesto al peso y su efecto consiste en reducir el peso *aparente* del objeto.

Los nadadores y buceadores están familiarizados con el efecto del empuje del agua, que es la misma fuerza que mantiene un barco a flote. El peso de un objeto que flota sobre el agua o bajo el agua tiene el mismo valor que el empuje y sentido contrario a este (véase Figura 2.66). Las fuerzas de empuje también actúan sobre objetos que están en el aire, pero son menos significativas y normalmente solo se detectan en objetos muy ligeros, como los globos.

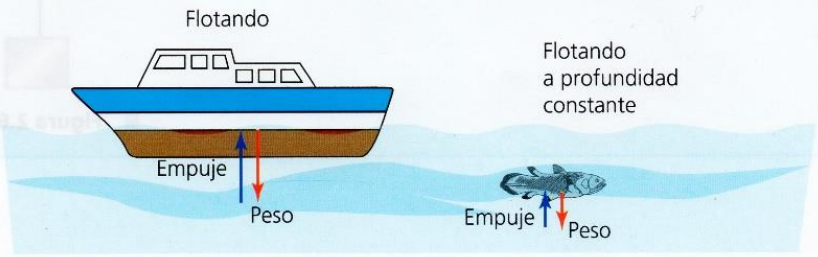


Figura 2.66
Fuerzas sobre objetos que flotan sobre el agua o sumergidos en agua

Fuerzas a distancia

La *fuerza gravitatoria* (*peso*) es distinta a todas las fuerzas que hemos estudiado hasta ahora porque actúa a través del espacio y no es necesario que haya contacto (entre el objeto y la Tierra). Las *fuerzas magnéticas* y las *fuerzas eléctricas* se comportan de forma similar y en el interior de los átomos existen también fuerzas a distancia, las *fuerzas nucleares*. La comprensión del funcionamiento de estas **fuerzas fundamentales** desempeña un papel muy importante en la física. Estas fuerzas se tratan con más detalle en capítulos posteriores del libro.

Para explicar con detalle las fuerzas de contacto que se han enumerado al principio de este capítulo, es necesario considerar las fuerzas electromagnéticas que actúan entre las partículas de los distintos objetos/sustancias.

Diagramas de cuerpo libre

Cuando dos objetos están en contacto ejercen fuerzas uno sobre otro. Esto significa que incluso el diagrama de fuerzas más simple puede resultar confuso si incluimos todas las fuerzas. Para evitar esta confusión, se suele dibujar *un único* objeto y las fuerzas que actúan *sobre* este objeto. Las fuerzas que actúan desde el cuerpo hacia todo lo demás *no* se incluyen en el diagrama.

Los diagramas en los que se representa un único objeto y las fuerzas que actúan sobre él se denominan **diagramas de cuerpo libre**. En la Figura 2.67 se muestran algunos ejemplos simples de este tipo de diagramas.

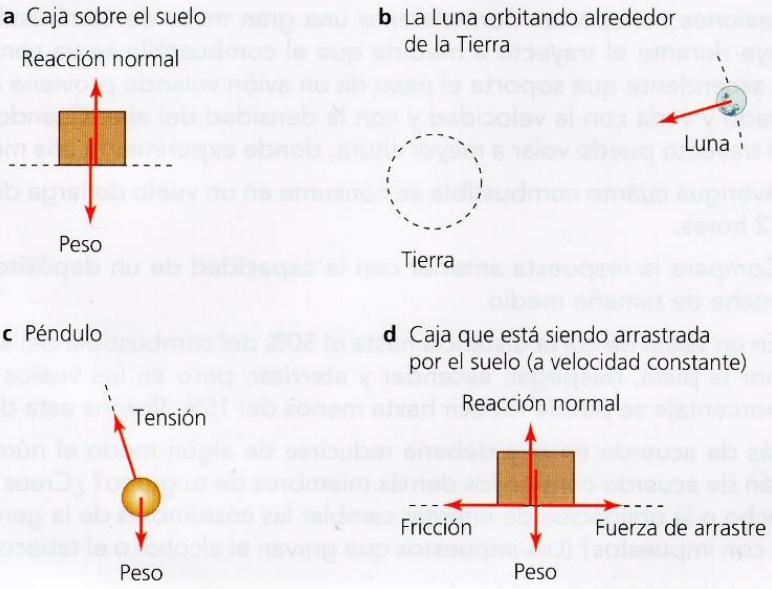


Figura 2.67 *Diagramas de cuerpo libre. El contorno del objeto se dibuja con una línea sólida y las fuerzas se representan en rojo. Las líneas de puntos no hace falta incluirlas*

53 En la Figura 2.68 se representan dos masas de distinto valor conectadas mediante una cuerda que pasa por una polea sin fricción. Dibuja los diagramas de cuerpo libre donde se representan las fuerzas que actúan sobre cada masa.

54 En la Figura 2.69 se representa un globo aerostático. Las dos cuerdas impiden que se eleve verticalmente. Dibuja un diagrama de cuerpo libre en el que aparezcan todas las fuerzas que actúan sobre el habitáculo (la cesta).



Figura 2.68



Figura 2.69

Fuerza resultante y componentes de una fuerza

Resultantes

Normalmente sobre un objeto actúa más de una fuerza. Para determinar el efecto global de dos o más fuerzas sobre un objeto debemos sumarlas, lo que comporta tener en cuenta su dirección y sentido. Esta suma de fuerzas da lugar a la fuerza **resultante** (global, neta) que actúa sobre el objeto.

La suma y la diferencia de vectores, como las fuerzas, se han estudiado en el Capítulo 1. Podría resultar de ayuda revisar lo aprendido en dicho capítulo antes de continuar.

55 Tres fuerzas independientes de 1 N, 2 N y 3 N actúan a la vez sobre un mismo objeto. Si las fuerzas son paralelas entre sí, ¿cuáles son los posibles valores del módulo de la fuerza resultante?

56 Utiliza un compás para determinar la resultante de dos fuerzas de 8,5 N y 12 N que actúan con un ángulo de separación de 120°.

57 Calcula la resultante de dos fuerzas perpendiculares de 7,7 N y 4,9 N.

58 La resultante de dos fuerzas es de 74 N hacia el oeste. Si una de las fuerzas tenía una módulo de 18 N hacia el sur, ¿cuál es el módulo y la dirección de la segunda fuerza?

59 Se arrastra por el suelo (horizontal) una caja de 32 kg mediante una fuerza horizontal de 276 N. La fuerza de fricción equivale al 76% de su peso.
- **a** Dibuja un diagrama de cuerpo libre para la caja.
- **b** ¿Cuál es la fuerza resultante sobre la caja?

Componentes

Dos o más fuerzas pueden combinarse para obtener una resultante, pero el proceso «contrario» es igualmente importante.

Se puede considerar que una fuerza determinada equivale a la resultante de dos fuerzas independientes que se suelen escoger perpendiculares entre sí ($F\cos\theta$ y $F\operatorname{sen}\theta$). A este proceso se le denomina *descomposición* de una fuerza en dos componentes (Capítulo 1).

La descomposición de una fuerza en sus componentes se suele realizar cuando la fuerza no actúa en la dirección del movimiento. A modo de ejemplo, consideremos el péndulo que se representa en la Figura 2.70. La fuerza del peso, mg, se puede descomponer en una fuerza, F_A, que actúa en la dirección instantánea de movimiento y otra fuerza, F_B, que forma un ángulo recto con F_A y que actúa en la misma dirección de la tensión de la cuerda con un módulo equivalente pero en sentido contrario.

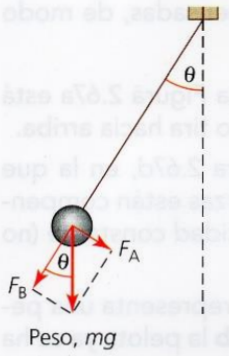


Figura 2.70
Descomposición del peso de un péndulo en sus componentes:

$F_A = mg\operatorname{sen}\theta$
$F_B = mg\cos\theta$

60 La masa del péndulo que se representa en la Figura 2.70 es 382 g y el ángulo θ es 27,4°.
- **a** ¿Cuál es la tensión de la cuerda?
- **b** ¿Cuál es la fuerza que actúa en la dirección del movimiento?

61 La masa que se representa en la Figura 2.71 está en reposo sobre la pendiente (*plano inclinado*).
- **a** Dibuja un diagrama de cuerpo libre en el que se representen las fuerzas que actúan sobre la masa.
- **b** Descompón el peso de la masa en dos componentes que sean paralela y perpendicular al plano inclinado, respectivamente.

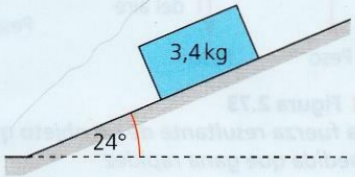


Figura 2.71

62 Una fuerza resultante de $8{,}42 \times 10^4$ N actuando sobre un tren de masa $3{,}90 \times 10^5$ kg lo acelera a razón de 0,216 ms^{-2} mientras viaja por una vía horizontal.
- **a** Si el tren empieza a subir por una pendiente que forma un ángulo de 1,00° con la horizontal, calcula la componente del peso que actúa en la dirección de la pendiente.
- **b** ¿Cuál es la nueva fuerza resultante que actúa sobre el tren?
- **c** Estima la aceleración del tren cuando empieza a subir por la pendiente.
- **d** Razona por qué le resulta más difícil subir por una pendiente escarpada a un tren que a un coche.

Equilibrio de traslación

Se dice que un objeto está en **equilibrio de traslación** cuando no actúa ninguna fuerza resultante sobre él.

El término «traslación» se refiere al desplazamiento de un lugar a otro. Estar «en equilibrio» significa que las fuerzas que actúan sobre un objeto están «compensadas», de modo que no hay efecto global y por tanto el objeto continúa moviéndose exactamente de la misma forma (o bien permanece en reposo).



Figura 2.72
El objeto está en equilibrio de traslación, pero no en equilibrio de rotación

Es importante tener en cuenta que sobre un objeto pueden actuar distintas fuerzas con la misma magnitud, direcciones paralelas y sentidos contrarios pero aplicadas *sobre líneas distintas*, de modo que puedan producir la rotación del objeto, como se muestra en la Figura 2.72. El objeto comenzará a rotar bajo el efecto de torsión de las dos fuerzas, pero no habrá movimiento de traslación. El objeto no está en *equilibrio de rotación*.

Primera ley del movimiento de Newton

En la primera ley del movimiento de Newton se resumen las condiciones necesarias para el equilibrio de traslación:

> La primera ley del movimiento de Newton afirma que un objeto permanecerá en reposo o continuará moviéndose en línea recta a menos que actúe una fuerza resultante sobre él.

En otras palabras, si sobre un objeto actúa una fuerza resultante, el objeto se acelera.

Ejemplos de la primera ley de Newton

Es imposible encontrar un objeto sobre la Tierra sobre el que no actúen fuerzas porque la gravedad afecta a todas las masas. Por tanto, sobre cualquier objeto que está en equilibrio deben actuar al menos dos fuerzas, o muchas más. Sobre todos los objetos que se mueven o que tienden a moverse actúan fuerzas de fricción. Si un objeto se encuentra en equilibrio de traslación es porque las fuerzas que actúan sobre él (en cualquier línea recta) están compensadas, de modo que la fuerza resultante es cero. Consideremos los ejemplos siguientes:

- **Objetos en reposo sin fuerzas laterales** – La caja que se representa en la Figura 2.67a está en equilibrio porque su peso equivale a la fuerza de reacción normal que lo tira hacia arriba.
- **Movimiento horizontal a velocidad constante** – Consideremos la Figura 2.67d, en la que también se representa un objeto en equilibrio de traslación porque las fuerzas están compensadas. Puede estar en reposo o bien moviéndose hacia la derecha a velocidad constante (no podemos saberlo a partir de este diagrama).
- **Movimiento vertical de los objetos en caída libre** – En la Figura 2.73 se representa una pelota que cae. En **a** la pelota empieza a caer y no hay resistencia del aire. En **b** la pelota ya se ha acelerado y hay una cierta resistencia del aire que se opone al movimiento, pero todavía hay una fuerza resultante y una aceleración hacia abajo. En **c** la velocidad de la pelota ha aumentado hasta el punto de que la resistencia del aire, cada vez mayor, llega a igualar en valor al peso, aunque en sentido contrario. En este momento ya no hay fuerza resultante y la pelota se encuentra en equilibrio de traslación, por tanto cae a velocidad constante (denominada velocidad o rapidez terminal).

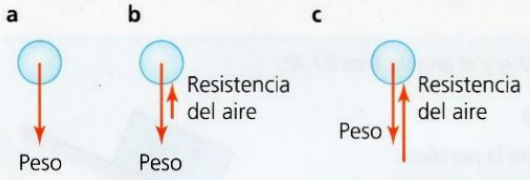


Figura 2.73
La fuerza resultante de un objeto que cae cambia a medida que gana rapidez

- **Aceleración horizontal** – Las fuerzas que actúan sobre una bicicleta y el ciclista se muestran en la Figura 2.74. Como la fuerza procedente de la carretera es mayor que la resistencia del aire, el ciclista acelera hacia la derecha. A medida que la bicicleta y el ciclista ganan rapidez, la resistencia del aire también aumenta. Con el tiempo, la resistencia del aire llega a tener el mismo valor que la fuerza hacia delante (aunque en sentido contrario) y se alcanza una velocidad máxima. Los principios que explican este movimiento son análogos a los que explican la velocidad terminal de un objeto en caída libre y a los que se aplican al movimiento de todos los vehículos.



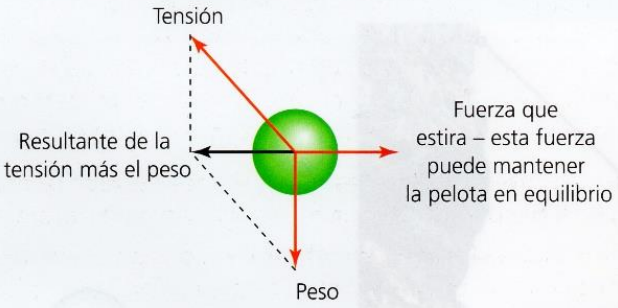
Figura 2.74
Un ciclista acelerando

Sabemos que cualquier objeto que lleva un tiempo en reposo (como un libro que está sobre una mesa) se encuentra en equilibrio y que un objeto que se mueve a velocidad constante también lo está. Sin embargo, hay que tener en cuenta que un objeto en movimiento que está en reposo momentáneamente no está en equilibrio. Por ejemplo, una piedra lanzada verticalmente hacia arriba se queda en reposo durante un instante cuando alcanza su altura máxima, pero la fuerza resultante no es cero y por tanto no está en equilibrio. Análogamente, cuando empieza la carrera el velocista está en reposo, pero es justamente el momento en el que la fuerza resultante y la aceleración son mayores.

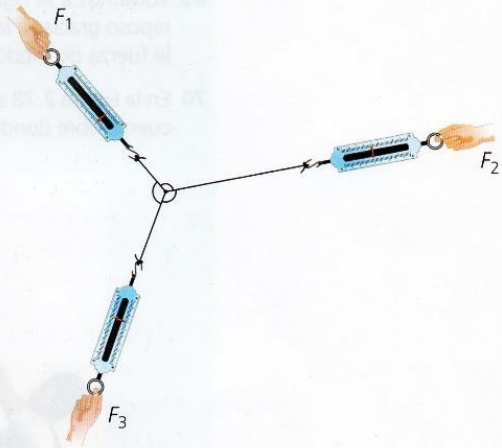
Tres fuerzas en equilibrio

Para conseguir el equilibrio de una masa sobre la que actúan dos fuerzas puede añadirse una tercera fuerza con el mismo módulo y dirección que la resultante de las otras dos pero en sentido contrario. Las tres fuerzas deben actuar sobre el mismo punto. Por ejemplo, en la Figura 2.75 se representa el diagrama de cuerpo libre de una pelota en suspensión en el extremo de un trozo de cuerda y que se mantiene en equilibrio mediante una fuerza lateral cuya magnitud es igual a la de la resultante del peso más la tensión de la cuerda.

El equilibrio de tres fuerzas se puede estudiar de una manera simple conectando tres dinamómetros a un mismo objeto sobre una superficie horizontal, como se muestra en la Figura 2.76. El sistema se mantiene en reposo para una amplia gama de combinaciones de fuerzas y ángulos, todos ellos fácilmente medibles.



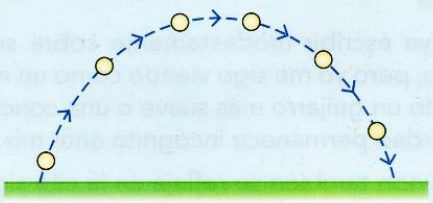
■ **Figura 2.75**
Una pelota en suspensión se mantiene en equilibrio mediante tres fuerzas



■ **Figura 2.76**
Estudio de tres fuerzas en equilibrio

63 Dibuja un diagrama de cuerpo libre en el que figuren claramente todos los elementos de interés para los casos siguientes:
- **a** un coche que se desplaza horizontalmente a velocidad constante
- **b** un avión que se desplaza horizontalmente a velocidad constante
- **c** un barco que decelera una vez se ha apagado el motor
- **d** un coche que acelera subiendo por una cuesta.

64 La trayectoria de un objeto lanzado verticalmente y sobre el que no actúa la resistencia del aire se representa en la Figura 2.77. Copia el diagrama y añádele vectores que representen las fuerzas que actúan sobre el objeto en cada posición.



■ **Figura 2.77**

65 Una maleta rígida que reposa sobre el suelo tiene una masa de 30,6 kg.
- **a** Dibuja un diagrama de cuerpo libre donde figuren claramente las fuerzas que actúan sobre la maleta.
- **b** Vuelve a dibujar el diagrama para representar ahora todas las fuerzas que actúan en el caso de que alguien intente levantar la maleta del suelo con una fuerza vertical de 150 N.

66 Colócate sobre una báscula de baño con un libro pesado en las manos. Mueve rápidamente el libro hacia arriba mientras observas la lectura de la balanza. Repite el experimento pero esta vez moviendo el libro rápidamente hacia abajo. Describe tus observaciones.

67 **a** Si estás en un ascensor con los ojos cerrados, ¿puedes distinguir si estás parado, subiendo o bajando? Razona tu respuesta.

b Una persona que viaja en ascensor experimenta dos fuerzas: su peso, que tira hacia abajo, y la fuerza de reacción normal ejercida desde el suelo del ascensor y que tira hacia arriba. Dibuja un diagrama de cuerpo libre en el que se representen las fuerzas que actúan sobre una persona que está en un ascensor si:

i el ascensor se mueve a velocidad constante
ii el ascensor comienza a moverse hacia abajo
iii el ascensor comienza a moverse hacia arriba
iv el ascensor decelera después de haber estado moviéndose hacia abajo
v el ascensor decelera después de haber estado moviéndose hacia arriba.

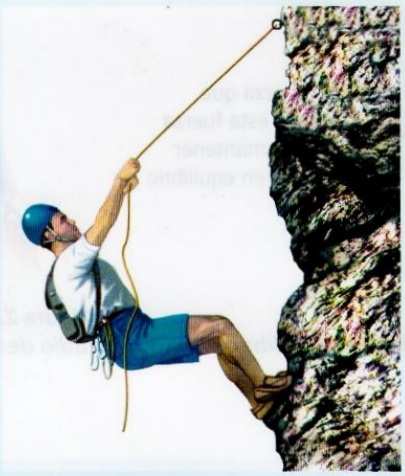
68 Un paracaidista cae con una velocidad terminal de unos 200 km h^{-1} cuando abre el paracaídas.

a Dibuja un diagrama de cuerpo libre en el que se representen las fuerzas que actúan sobre el *paracaidista*:
i justo en el momento en que se abre el paracaídas
ii justo antes de que el paracaidista toque el suelo.

b Dibuja un diagrama de cuerpo libre donde se represente esquemáticamente la variación de la velocidad del paracaidista desde el momento en que salta del avión hasta el momento en que aterriza.

69 Volvamos a la Figura 2.71, en la que se representa una caja en reposo sobre una pendiente. La caja permanece en reposo gracias a la fuerza de fricción que se opone al movimiento de bajada por la pendiente. ¿Cuál es el módulo de la fuerza de fricción?

70 En la Figura 2.78 se representa un escalador que utiliza una cuerda para escalar una montaña. Dibuja un diagrama de cuerpo libre donde se representen las fuerzas que actúan sobre el escalador.



■ **Figura 2.78**



■ **Figura 2.79**

71 En la Figura 2.79 se representan dos gotas de agua que caen una al lado de la otra con la misma velocidad instantánea. En la figura se muestran las fuerzas que actúan sobre la gota A, con un radio *r*.

a Copia el diagrama y dibuja las fuerzas que actúan sobre la gota B, con un radio 2*r*.

b Describe el movimiento inmediato de las dos gotas y explica la diferencia.

Naturaleza de la ciencia

Aristóteles y la filosofía natural

A Isaac Newton se le atribuye escribir modestamente sobre sus descubrimientos: «No sé cómo me verá el resto del mundo, pero yo me sigo viendo como un niño que juega en la orilla del mar y que se divierte encontrando un guijarro más suave o una concha más bella de lo corriente, mientras el gran océano de la verdad permanece incógnito ante mí».

La aparente humildad de Newton también se refleja en la cita siguiente: «...si he logrado ver un poco más allá es porque me he subido a hombros de gigantes». Aunque esta cita no sea estrictamente original, sí se cree que Newton reconocía el mérito de los científicos y filósofos que le precedieron. Entre ellos se encontraba Aristóteles.

Aristóteles (384–322 a.C.) fue un filósofo griego y una de las figuras fundamentales y más reconocidas en el desarrollo del pensamiento humano y la filosofía. Su obra abarca numerosos temas, entre los que se encuentran la interpretación del mundo natural y los principios de lo que actualmente denominamos ciencia. Antiguamente, la ciencia se denominaba «filosofía natural» y se abordaba de un modo muy distinto al de los métodos científicos modernos.

Aunque la «ciencia» de la época no contemplaba la observación cuidadosa, las medidas, los cálculos matemáticos o los experimentos a los que tan habituados estamos (recordemos que estamos hablando de hace 2300 años), Aristóteles sí reconocía la necesidad de explicaciones universales (que lo abarcaran todo) de los fenómenos naturales del mundo que le rodeaba.

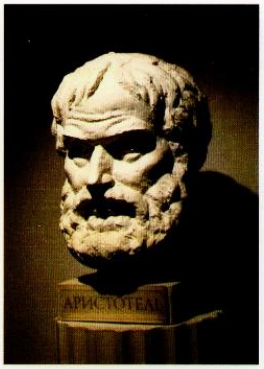


Figura 2.80
Aristóteles

Él creía que todo lo que había en el mundo provenía de la combinación de cuatro elementos a los que denominaba tierra, fuego, aire y agua. La Tierra era el centro de todo y cada uno de los cuatro elementos terrestres tenía su propio lugar. Cuando algo no se encontraba en su lugar tendía a volver a este; de esta manera explicaba, por ejemplo, por qué cae la lluvia y por qué las llamas y las burbujas ascienden.

Con nuestros vastos conocimientos actuales sobre el mundo es fácil menospreciar la obra de Aristóteles y señalar sus inconsistencias. Sin embargo, sus ideas fundamentales sobre el movimiento, por ejemplo, eran tan simples y convincentes que no fueron puestas en duda durante más de 1500 años, hasta la época de Galileo y Newton.

Fricción sólida

Como explicamos antes, la fricción es una fuerza que intenta detener el movimiento de cualquier superficie sólida sobre otro sólido con el que está en contacto. El origen de la fuerza de fricción puede ser diverso y complejo pero, en líneas generales, la magnitud de las fuerzas de fricción depende de:

- la naturaleza de los dos materiales
- la «rugosidad» de las superficies de los dos materiales (el concepto de rugosidad no es fácil de definir y aunque las superficies más rugosas suelen ocasionar mayor fricción, sería erróneo asumir que las superficies más rugosas *siempre* incrementan las fuerzas de fricción)
- las fuerzas que actúan en dirección normal a las superficies (empujándolas una contra otra).

Para reducir la fricción entre dos superficies determinadas se debe colocar algo entre ellas. Puede ser agua, aceite, aire, grafito o pequeños rodillos o bolas. Los fluidos que se utilizan con tal fin se denominan *lubricantes*.

Las fuerzas de fricción se pueden estudiar mediante un aparato simple como el que se muestra en la Figura 2.81, en la que se representa un bloque de madera que está siendo arrastrado sobre una mesa horizontal. La fuerza que tira del bloque se va aumentando hasta que el bloque empieza a moverse.

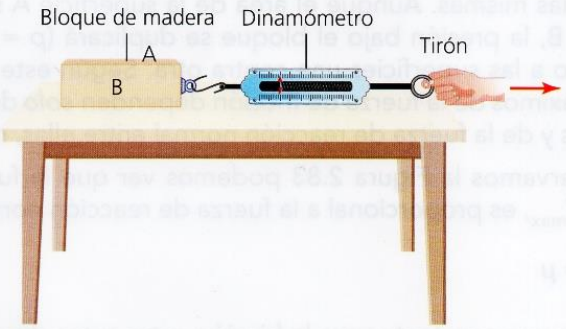
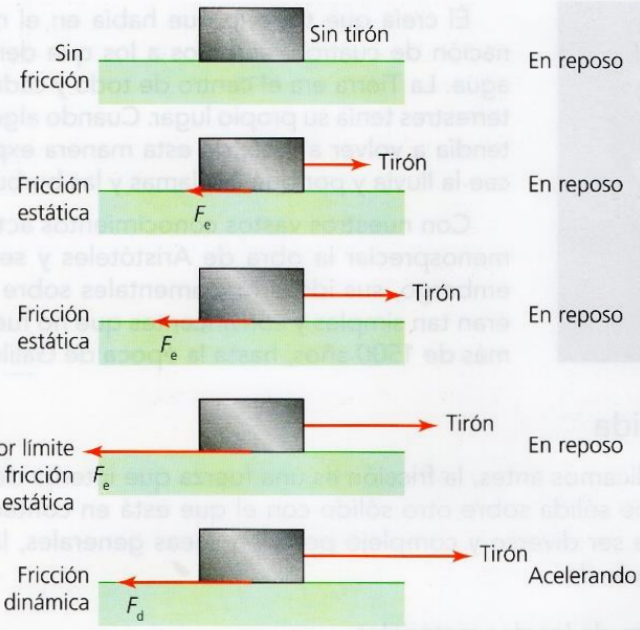


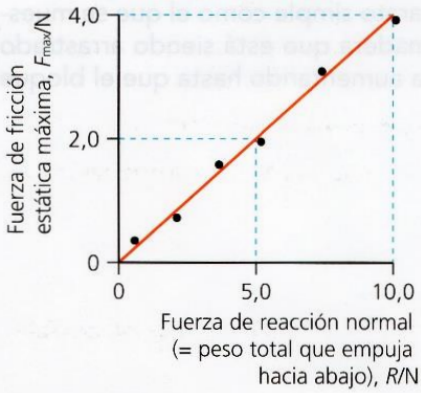
Figura 2.81
Experimento simple para medir las fuerzas de fricción

Aplicando la primera ley de Newton, si el bloque no se mueve es porque se encuentra en equilibrio de traslación; en este caso no hay fuerza resultante neta y la fuerza de fricción debe ser igual en magnitud y en sentido opuesto a cualquier fuerza que tire del bloque, como la que indica el dinamómetro. Si se tira del bloque con una fuerza mayor pero el bloque todavía no se mueve, la fuerza de fricción debe haber aumentado, pero sigue manteniéndose igual y opuesta a la fuerza que tira del bloque. La fuerza de fricción, sin embargo, tiene un límite superior, mientras que la fuerza que tira del bloque puede seguir aumentando. Llegará un momento en que la fuerza que tira del bloque superará al máximo valor posible de la fuerza de fricción. En ese momento habrá fuerza resultante neta sobre el bloque y este se acelerará (véase Figura 2.82).



■ **Figura 2.82**
Variación de las fuerzas de fricción a medida que la fuerza aplicada (tirón) aumenta

Normalmente la fuerza de fricción durante el movimiento (**fricción dinámica**) es *menor* que la fuerza máxima de fricción antes de que el movimiento haya comenzado (**fricción estática**). Se puede considerar que la fuerza de fricción dinámica es aproximadamente la misma con independencia de la velocidad. Es decir, dadas dos superficies cualesquiera, la fuerza de fricción dinámica tiene un valor aproximadamente constante, mientras que la fuerza de fricción estática puede variar desde cero hasta un valor límite.



■ **Figura 2.83**
Variación habitual del máximo de la fuerza de fricción estática respecto a la fuerza de reacción normal (para la fricción dinámica se obtiene un patrón de resultados análogo)

En la Figura 2.83 se representan los resultados habituales de la variación del valor máximo de la fuerza de fricción estática en función del peso del bloque, que se puede incrementar poniendo masas sobre su superficie. Fíjate en que el peso total equivale a la fuerza de reacción normal entre las superficies, R.

Si repetimos el experimento de la Figura 2.81 con el mismo bloque pero con la superficie B sobre la mesa, las medidas de las fuerzas de fricción serán (aproximadamente) las mismas. Aunque el área de la superficie A sea la mitad que la de la superficie B, la presión bajo el bloque se duplicará ($p = F/A$ – véase Capítulo 3), empujando a las superficies una contra otra. Según este análisis simplificado, los valores máximos de la fuerza de fricción dependen *solo* de la naturaleza de las dos superficies y de la fuerza de reacción normal entre ellas, no así del área asociada.

Si observamos la Figura 2.83 podemos ver que la fuerza de fricción estática máxima, F_{max}, es proporcional a la fuerza de reacción normal, R, de modo que:

$$\frac{F_{max}}{R} = \mu$$

donde μ es una constante para la fricción entre estos dos materiales que se puede determinar a partir de la pendiente de la recta que aparece en la gráfica.

Habitualmente se utilizan dos símbolos distintos, uno para la fricción estática, μ_e, y otro para la fricción dinámica, μ_d. Estas constantes se denominan **coeficientes de fricción**. (El término «coeficiente» hace referencia a que se trata de una constante que multiplica una variable, en este caso una fuerza). Como estos coeficientes/constantes son cocientes de fuerzas, no tienen unidades.

En la Tabla 2.2 se dan algunos ejemplos de coeficientes de fricción estática. Los valores dados corresponden a dos superficies limpias, secas, planas y suaves. Y aunque estos supuestos simplificados son un punto de partida muy útil, debe entenderse que en situaciones reales las fuerzas de fricción suelen ser complejas e impredecibles.

Tabla 2.2
Valores aproximados de los coeficientes de fricción estática

Materiales		Coeficientes de fricción estática, (μ_e) aproximados
Acero	Hielo	0,03
Esquí	Nieve seca	0,04
Teflón	Acero	0,05
Grafito	Acero	0,1
Madera	Hormigón	0,3
Madera	Metal	0,4
Neumático de caucho	Hierba	0,4
Neumático de caucho	Superficie de una carretera (húmeda)	0,5
Vidrio	Metal	0,6
Neumático de caucho	Superficie de una carretera (seca)	0,8
Acero	Acero	0,8
Vidrio	Vidrio	0,9
Piel	Metal	0,9

Las dos ecuaciones siguientes para las fuerzas de fricción pueden encontrarse en el *Apéndice de datos de Física*.

$F_f \leq \mu_e R$
$F_f \leq \mu_d R$

Por otra parte, los máximos de las fuerzas de fricción vienen dados por $F_{max} = \mu_e R$ y $F_{max} = \mu_d R$.

Ejemplo resuelto

11 a ¿Cuál es el coeficiente de fricción para las dos superficies que se representan en la Figura 2.83?

b Si suponemos que los resultados se obtienen con un aparato como el de la Figura 2.81, ¿qué fuerza mínima se necesitaría para desplazar un bloque de masa total
i 200 g?
ii 2000 g?
iii ¿Por qué es poco fiable la respuesta al apartado **ii**?

c Considerando el mismo aparato anterior con una masa de 200 g, estima un valor para la fuerza de fricción dinámica en los siguientes casos:
i un movimiento a $1{,}0\,m\,s^{-1}$
ii un movimiento a $2{,}0\,m\,s^{-1}$

a $\mu_e = \frac{F_{max}}{R} = \frac{4{,}0}{10{,}0} = 0{,}40$ (equivale a la pendiente de la recta de la gráfica).

b i $F_f = \mu_e R = \mu_e mg = 0{,}40 \times 0{,}200 \times 9{,}81 = 0{,}78\,N$
ii $0{,}40 \times 2{,}000 \times 9{,}81 = 7{,}8\,N$
iii Porque la respuesta corresponde a una extrapolación de un valor muy lejano al intervalo de resultados que se muestra en la gráfica.

c i Podríamos esperar que la fuerza de fricción dinámica fuera un poco menor que la fuerza de fricción estática máxima, pongamos 0,6 N en lugar de 0,78 N.
ii Normalmente se considera que la fuerza de fricción dinámica es independiente de la velocidad, por tanto la fuerza seguiría estando en torno a 0,6 N a la velocidad más alta.

Aplicaciones

Neumáticos y seguridad vial

La seguridad vial depende en gran medida tanto de la naturaleza de la superficie de la vía como de los neumáticos de los vehículos. La fricción entre la vía y el vehículo proporciona las fuerzas necesarias para cualquier cambio de velocidad: aceleración, frenado, cambios de dirección y giros. Un neumático liso conserva la máxima fricción cuando la vía está seca, pero cuando está húmeda, las rugosidades y las ranuras del neumático son necesarias para dispersar el agua (Figura 2.84).

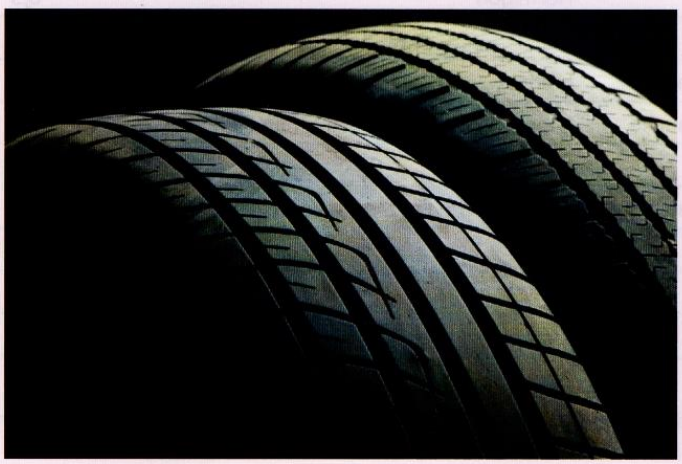


Figura 2.84
Banda de rodadura de un neumático de coche

La superficie de la vía debe ser lo suficientemente rugosa como para producir una fricción suficiente. Por tanto, conviene volver a asfaltar la vía cada pocos años para evitar que se quede excesivamente lisa. Esto último cobra especial importancia cuando hay un giro cerrado o una cuesta escarpada. Todo lo que haya entre los neumáticos y la superficie de la vía (por ejemplo aceite, agua, hielo o nieve) puede afectar a la fricción y tener un efecto importante sobre la seguridad vial.

El aumento del área superficial de los neumáticos de un vehículo produce un cambio en la presión bajo ellos, y este cambio, a su vez, puede modificar la naturaleza del contacto entre las superficies. Por ejemplo, para un tractor hundirse en un suelo blando es un grave problema y esa situación es más compleja que una simple fricción entre dos superficies. Los vehículos que se desplazan sobre suelo blando necesitan neumáticos con áreas superficiales grandes para evitar el posible hundimiento.

1 Utiliza Internet para averiguar qué materiales se utilizan en la construcción de neumáticos y superficies viales con el fin de producir coeficientes de fricción elevados.

72 **a** Explica qué significa que un coeficiente de fricción tenga valor cero.
b ¿Es posible que un coeficiente de fricción tenga un valor mayor que 1? Razona tu respuesta.

73 **a** Un contenedor de madera de 30 kg descansa sobre un suelo seco de hormigón. Estima la fuerza necesaria para empezar a moverlo lateralmente.
b Estima la fuerza de fricción sólida que se opone al movimiento de una chica de 55 kg que patina sobre hielo.

74 Considera la pregunta 61 y la Figura 2.71. La masa solo puede estar en reposo sobre la pendiente a causa de la fricción.
a Explica cómo se puede utilizar un plano inclinado para determinar el valor del coeficiente de fricción estática entre las superficies.
b Calcula el valor del coeficiente de fricción estática si el bloque que se muestra en el diagrama comienza a deslizarse por la pendiente cuando el ángulo es 45°.

75 El coeficiente de fricción entre un coche que se mueve y la superficie de la vía en un día seco es 0,67.
a Si el coche y su conductor tienen una masa total de 1400 kg, ¿qué fuerza de fricción actúa entre la vía y el neumático?
b Si entran en el coche tres pasajeros con una masa total de 200 kg, calcula el nuevo valor de la fuerza de fricción.
c Discute los posibles efectos sobre la seguridad vial del aumento del número de pasajeros de un coche.

76 ¿Cómo se puede incrementar la fricción con la vía en condiciones de hielo?

77 ¿Por qué crees que los conductores de coches de Fórmula 1 «calientan» los neumáticos de sus coches? Averigua cómo lo hacen. Sugiere también un motivo por el que los neumáticos de Fórmula 1 son tan grandes.

78 ¿En qué circunstancias crees que una superficie «rugosa» podría reducir la fricción (en lugar de aumentarla)?

Naturaleza de la ciencia

Principia de Newton: una combinación espectacular de matemáticas e intuición

Existe un amplio consenso en considerar a Isaac Newton como uno de los científicos más importantes de la historia de la humanidad. Sus tres libros, que reciben en conjunto el nombre de *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* o más comúnmente *Principia*, y que incluyen las leyes del movimiento (y de la gravitación), se encuentran entre los libros más influyentes de todas las épocas (Figura 2.85).

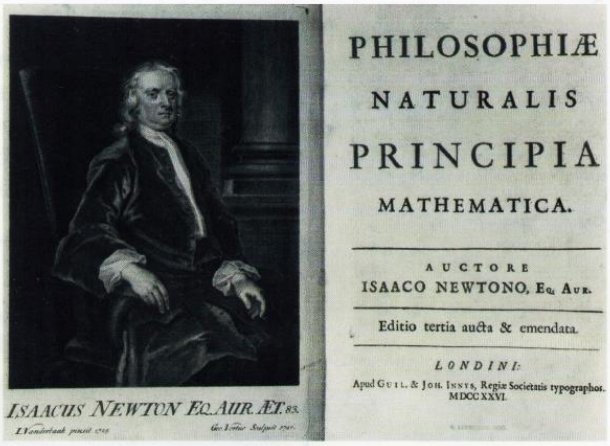


Figura 2.85
Primera página del libro Principia *de Newton*

Newton era británico, pero sus libros están escritos en latín. Se suele atribuir a Newton el invento del cálculo infinitesimal, necesario para avanzar en la comprensión de la mecánica. Actualmente, el cálculo desempeña un papel muy importante en la aplicación de las matemáticas en muchas ramas de la física avanzada. Sin embargo, el «invento» del cálculo infinitesimal fue objeto de debate entre Newton y el reputado matemático alemán Gottfried Leibniz, quien también se atribuía su invención. (Pero, ¿hasta qué punto se puede decir que el cálculo fue inventado? ¿O fue descubierto?)

En una de las anécdotas más famosas de la historia de la ciencia se dice que Newton sintió una repentina inspiración que le llevó a pensar en la gravedad mientras observaba una manzana que caía de un árbol. Es bonito pensar que fue un momento de *inspiración*, una *intuición*, pero nunca sabremos si la anécdota es cierta o no. El propio Newton, no obstante, hizo referencia a manzanas que caían de los árboles cuando explicaba los procesos de pensamiento que le llevaron a formular su ley de gravitación universal.

Los momentos repentinos e inesperados de inspiración siempre han desempeñado un importante papel en el desarrollo de nuevas ideas en todas las áreas del pensamiento humano. Sin embargo, el inventor estadounidense Thomas Edison es conocido por decir que «el genio es un 1% de inspiración y un 99% de transpiración», sugiriendo que también se necesita trabajar duro para convertir las grandes ideas en algo práctico.

Segunda ley del movimiento de Newton

La primera ley de Newton establece que hay un vínculo entre la fuerza resultante y la aceleración. La segunda ley lleva está afirmación un paso más allá y establece la conexión matemática, que afirma que cuando una fuerza resultante actúa sobre una masa (constante), la aceleración es proporcional a la fuerza:

$a \propto F$

Tanto la fuerza como la aceleración son magnitudes vectoriales y la aceleración se produce en la misma dirección de la fuerza.

En la mayoría de los cursos de física se dedica un gran número de sesiones al estudio de los efectos de las distintas fuerzas y masas sobre la aceleración producida. Para obtener buenos resultados es esencial poder reducir los efectos de la fricción, para lo que se utilizan túneles de viento o pavimentos de fricción compensada. Con este tipo de experimentos también se demuestra que si se aplica la misma fuerza resultante sobre distintas masas, la aceleración producida es inversamente proporcional a la masa, m; por ejemplo, si la masa se duplica, la aceleración se reduce a la mitad.

Combinando estos resultados, vemos que la aceleración es proporcional a F/m. La segunda ley de Newton puede escribirse como:

$F \propto ma$

Si definimos la unidad de la fuerza, el newton, como la fuerza que acelera 1 kg 1 m s^{-2}, entonces podemos escribir:

fuerza (N) = masa (kg) x aceleración (m s^{-2})

$F = ma$

Esta conocida ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Pero se trata simplemente de una versión de la segunda ley de Newton restringida a masas constantes. En apartados posteriores del capítulo veremos una segunda versión de la ley de Newton cuando hayamos introducido el concepto de momento.

Fíjate en que para fuerzas gravitatorias (pesos, P), $F = ma$ se puede escribir como $P = mg$, donde g representa la aceleración debida a la gravedad. (La expresión $P = mg$ se ha usado al principio del capítulo).

La segunda ley de Newton muestra que un cambio repentino de velocidad (una aceleración o una deceleración elevadas) requiere una fuerza también elevada ($F \propto a$). Esta idea es muy útil para explicar, por ejemplo, por qué se rompe una copa de cristal cuando cae sobre el suelo, pero no necesariamente cuando cae sobre un cojín (un menor tiempo y una mayor deceleración sobre el suelo duro, de modo que las fuerzas que actúan sobre la copa son mayores).

Ejemplos resueltos

12 **a** ¿Qué fuerza resultante se necesita para acelerar 1,8 kg a 3,3 $m s^{-2}$?
b ¿Qué aceleración se produciría si se aplicara la misma fuerza a una masa de 800 g?

a $F = ma$
$F = 1{,}8 \times 3{,}3$
$F = 5{,}9\,N$

b $a = \frac{F}{m}$
$a = \frac{5{,}9}{0{,}800}$
$a = 7{,}4\,m s^{-2}$

13 El motor de un coche produce una fuerza hacia delante de 4400 N, pero las fuerzas de la resistencia del aire y de la fricción, opuestas al movimiento, representan un total de 1900 N.

a ¿Cuál es la fuerza resultante que actúa sobre el coche?

b Si el coche se acelera 1,8 m s–2 bajo la acción de esta fuerza, ¿cuál es su masa total?

a fuerza resultante, $F = 4400 - 1900$
$F = 2500$ N hacia delante

b $m = \frac{F}{a}$
$m = \frac{2500}{1{,}8}$
$m = 1400$ kg

14 **a** ¿Cuál es la fuerza resultante que actúa sobre una masa de 764 g que cae hacia la Tierra (suponiendo que no hay resistencia del aire)?

b ¿Con qué nombre se conoce a esta fuerza?

a $F = ma$
$F = 0{,}764 \times 9{,}81$
$F = 7{,}49$ N

b Esta fuerza se suele denominar peso del objeto y, en este contexto, la ecuación $F = ma$ normalmente se escribiría $P = mg$.

La segunda ley de Newton también se puede aplicar a masas pequeñas, como las de las partículas atómicas. Por ejemplo, la masa de un electrón es de $9{,}1 \times 10^{-31}$ kg y si actuara sobre él una fuerza de 1 N, ¡se aceleraría a una tasa de $1{,}1 \times 10^{30}$ m s^{-2}!

Fuerzas que actúan durante un tiempo limitado

Las fuerzas resultantes que modifican las velocidades de varios objetos no siguen actuando siempre. Normalmente actúan durante unos pocos segundos o menos, y en el caso de varios **impactos** o **colisiones**, la duración de las fuerzas involucradas puede ser incluso de fracciones de segundo. (La palabra **interacción** se suele utilizar como un término general que incluye todas las situaciones posibles).

A modo de ejemplo, consideremos un objeto que cae. Si se deja caer una masa sobre una superficie, la fuerza ejercida durante el impacto *no* es igual a su peso (como se suele creer), sino que se puede calcular a partir de $F = ma$. Por ejemplo, si una masa de 2,0 kg cae sobre arena y su velocidad se reduce desde 6,0 m s^{-1} hasta cero en 0,50 s, la deceleración media es –12 m s^{-2} [(0–6,0)/0,50] y la fuerza media de deceleración es de 24 N. Si se dejara caer la misma masa a la misma velocidad pero sobre hormigón, el tiempo para el impacto sería mucho menor y la fuerza sería mucho mayor. Por ejemplo, si el tiempo para el impacto fuera de 0,050 s, la fuerza de deceleración media sería de 240 N.

Las fuerzas sobre el saltador de longitud de la Figura 2.86 se reducen porque el tiempo para el impacto aumenta gracias a que cae sobre un banco de arena.

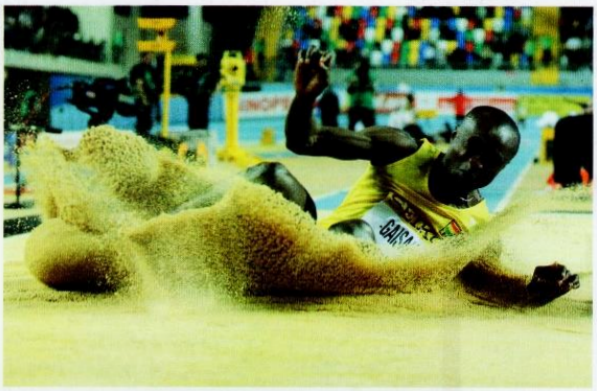


Figura 2.86
El impacto sobre un banco de arena reduce la fuerza

Siempre que un objeto en movimiento se detiene, cuanto mayor es el tiempo para el impacto, menor es la deceleración y, en consecuencia, las fuerzas involucradas son también menores. Estas ideas son muy útiles cuando se utiliza la física para explicar, por ejemplo, cómo se reducen las fuerzas en los accidentes.

Cuando el objetivo es acelerar un objeto mediante una fuerza, cuanto mayor sea el tiempo durante el que se aplica la fuerza, mayor será el cambio de la velocidad. En muchas actividades deportivas la pelota se lanza con algún tipo de bate, palo o raqueta y cuanto mayor sea el tiempo de contacto, mejor. Este es uno de los motivos por los que se aconseja «marcar el movimiento completo» en un golpe.

79 ¿Qué fuerza resultante se necesita para acelerar un tren de masa 3,41 x 10^5 kg desde el reposo hasta 15,0 m s^{-1} en 20 s exactamente?

80 Cuando se aplica una fuerza de 5,6 N a una masa de 4,3 kg se acelera a 0,74 m s^{-2}. Calcula la fuerza de fricción que actúa sobre la masa.

81 Una avioneta de masa 12 400 kg se acelera desde el reposo por una pista mediante una fuerza resultante de 29 600 N.
- **a** ¿Cuál es la aceleración de la avioneta?
- **b** Si la aceleración se mantiene constante, ¿qué distancia se necesita para que la avioneta alcance su velocidad de despegue, 73,2 m s^{-1}?

82 Un coche de masa 1200 kg viaja a 22 m s^{-1} cuando el conductor pisa el pedal del freno. El coche se para tras recorrer una distancia de 69 m.
- **a** ¿Cuál es la deceleración del coche?
- **b** ¿Cuál es la fuerza resultante media que actúa sobre el coche?

83 Se tira horizontalmente de una caja de gran tamaño de masa 150 kg mediante una cuerda fina con el objeto de arrastrarla por el suelo. La caja comienza a moverse cuando la fuerza de fricción es de 340 N.
- **a** Dibuja un diagrama de cuerpo libre donde se representen todas las fuerzas que actúan sobre la caja cuando esta empieza a moverse.
- **b** Si la tensión de la cuerda es 380 N, calcula la aceleración de la caja.
- **c** Explica qué ocurriría si se intentara acelerar la caja a 1 m s^{-2}.

84 Un bloque de metal de masa 650 g se mueve horizontalmente sobre una plancha de vidrio con una velocidad constante mientras se le aplica una fuerza de 2,8 N.
- **a** ¿Cuál es el coeficiente de fricción dinámica para estas superficies?
- **b** Calcula la aceleración producida sobre un bloque del mismo metal con una masa de 940 g si se tira de él por la plancha de vidrio con una fuerza de 4,5 N.

85 Una pequeña vagoneta de masa 12 500 kg se encuentra en reposo sobre una pendiente.
- **a** Si el coeficiente de fricción estática es 0,42, ¿cuál es el mayor ángulo de inclinación (respecto a la horizontal) que permitirá que la vagoneta siga estando en reposo?
- **b** Si la pendiente tiene justamente el grado de inclinación calculado en el apartado anterior y el motor de la vagoneta produce una fuerza de 6,0 x 10^4 N paralela a la vía, calcula la aceleración de la vagoneta al subir por la pendiente.

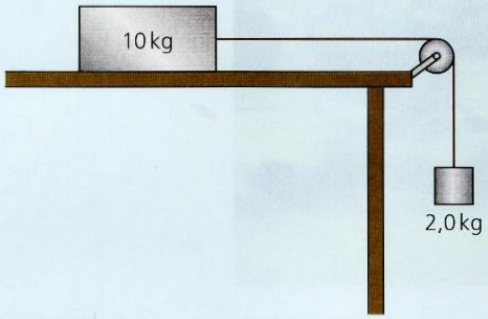
86 Utiliza la segunda ley de Newton para explicar por qué te hace más daño un golpe producido por una pelota dura que un golpe producido por una pelota blanda, si ambas pelotas tienen la misma masa y llevan la misma velocidad.

87 ¿Qué masa se necesitaría para acelerar un protón (masa $1{,}67 \times 10^{-27}$ kg) a $1{,}0 \times 10^{10}\,m\,s^{-2}$?

88 Un carrito que contiene arena es empujado a través de una superficie horizontal mediante una fuerza resultante pequeña pero constante. Describe y explica el movimiento del carrito si la arena puede caer a través de un agujero situado al fondo del carrito.

89 Un hombre de 82,5 kg de masa permanece inmóvil en el interior de un ascensor que acelera hacia arriba a $1{,}50\,m\,s^{-2}$.
- **a** ¿Cuál es la fuerza resultante que actúa sobre el hombre?
- **b** ¿Cuál es la fuerza de reacción normal que actúa sobre el hombre y que va en sentido ascendente desde el suelo?

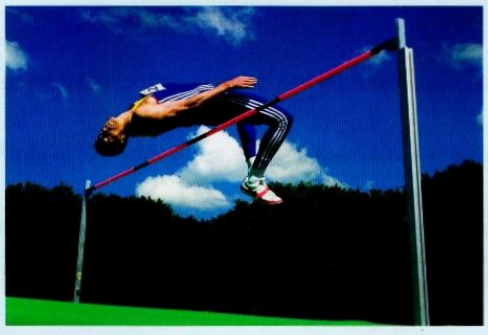
90 En la Figura 2.87 se representan dos masas que están conectadas mediante una correa que pasa por una polea.



■ **Figura 2.87**

- **a** Calcula la aceleración de los dos bloques suponiendo que no hay fricción.
- **b** ¿Qué fuerza resultante se necesita para acelerar la masa de 2,0 kg hasta el valor de la aceleración obtenido en **a**?
- **c** Dibuja diagramas de cuerpo libre para las dos masas en los que se representen claramente los módulos y direcciones de todas las fuerzas implicadas.

91 Cuando un saltador de altura (Figura 2.88) de masa 75,4 kg salta una barra situada a 2,07 m de altura eleva su centro de masas desde 0,980 m hasta 2,05 m.



■ **Figura 2.88**

- **a** ¿Qué velocidad de despegue vertical necesita el saltador para elevarse hasta la altura de la barra?
- **b** Si el atleta tarda 0,22 en proyectarse hacia arriba, ¿cuál es la fuerza resultante media que actúa sobre él?
- **c** ¿Qué fuerza ascendente ejerce el suelo sobre él?
- **d** ¿Qué hace el atleta para que el suelo lo impulse hacia arriba?
- **e** Utiliza la física para explicar por qué es conveniente que el atleta caiga sobre espuma en lugar de caer sobre suelo duro.

92
- **a** Explica por qué una persona debería doblar las rodillas al caer cuando salta, aunque sea un salto desde muy poca altura.
- **b** Explica el mecanismo por el cual las bolsas de aire (airbags) y/o los cinturones de seguridad reducen los daños a los pasajeros de un coche en caso de accidente.

93 Se tira una pelota de baloncesto de 0,62 kg de masa sobre una báscula de baño con una velocidad de impacto de $16\,m\,s^{-1}$ y se estima que la fuerza máxima es de 280 N.
- **a** Si la fuerza media que se ejerce sobre la pelota es del orden de la mitad de la fuerza máxima, ¿cuál es la deceleración aproximada de la pelota?
- **b** Estima cuánto tiempo está la pelota en contacto con la báscula antes de rebotar.

Tercera ley del movimiento de Newton

La tercera ley del movimiento de Newton trata de las fuerzas que actúan *entre* dos cuerpos. Siempre que dos objetos *cualesquiera* entran en contacto o interactúan de algún modo, ejercen fuerzas uno sobre otro (Figura 2.89), Las dos fuerzas deben tener *siempre* el mismo módulo; para decirlo de una manera más exacta, la fuerza que A ejerce sobre B es igual que la que ejerce B sobre A pero en sentido *opuesto*.

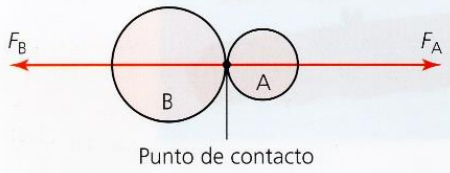


Figura 2.89
Cuando dos cuerpos interactúan $F_A = -F_B$

La **tercera ley del movimiento de Newton** afirma que siempre que un cuerpo ejerce una fuerza sobre un segundo cuerpo, este a su vez ejerce exactamente la misma fuerza sobre el primero, pero en sentido opuesto.

En esencia, esta ley afirma que las fuerzas *siempre* tienen que darse en pares, aunque es importante comprender que las dos fuerzas deben actuar sobre *distintos* cuerpos y en sentidos opuestos. Las dos fuerzas son siempre del mismo tipo, por ejemplo gravitatoria/gravitatoria o fricción/fricción. A veces esta ley se enuncia en la forma en que lo hacía Newton: «a toda fuerza de acción le corresponde una fuerza de reacción igual y de sentido opuesto». Para decirlo en términos actuales, es imposible empujar algo que no nos empuje a su vez. A continuación se enumeran algunos ejemplos:

- Si tiramos de una cuerda, la cuerda tira de nosotros.
- Si la Tierra tira de una persona, la persona tira de la Tierra (Figura 2.90).
- Si el puño golpea la mejilla, la mejilla golpea el puño (Figura 2.91).
- Si ejercemos una fuerza sobre el suelo, el suelo ejerce una fuerza sobre nosotros.
- Si un barco empuja el agua hacia abajo, el agua empuja el barco hacia arriba (Figura 2.92).
- Si el Sol atrae a la Tierra, la Tierra atrae al Sol.
- Si un avión empuja el aire hacia abajo, el aire empuja el avión hacia arriba.



Figura 2.90
La fuerza sobre la mujer es igual a la fuerza sobre la Tierra pero en sentido opuesto



Figura 2.91
La fuerza sobre el guante es igual a la fuerza sobre la mejilla pero en sentido opuesto

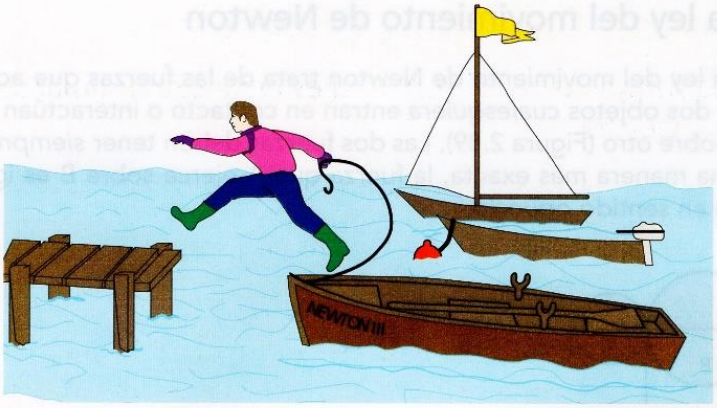


Figura 2.92
La fuerza que empuja al hombre hacia delante es igual a la fuerza que empuja al barco hacia atrás

94 En la Figura 2.93 se sugiere un método para mover un barco de vela cuando no hay viento. Discute la efectividad de este método.

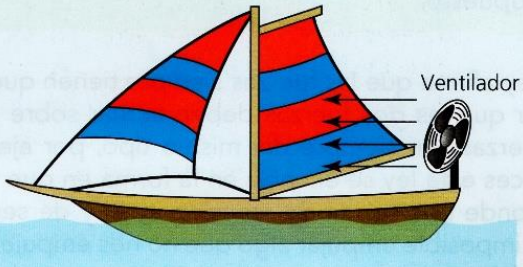


Figura 2.93

95 Un libro tiene un peso de 2 N y se encuentra en reposo sobre una mesa. La mesa ejerce una fuerza de reacción normal de 2 N hacia el libro. Explica por qué estas dos fuerzas no constituyen un ejemplo de la tercera ley de Newton.

96 Anteriormente se han enumerado siete ejemplos de pares de fuerzas que cumplen la tercera ley de Newton. Da tres ejemplos más. Intenta utilizar distintos tipos de fuerzas.

97 Colocamos sobre una báscula una jaula grande en cuyo interior hay un pájaro inmóvil sobre una percha. ¿Qué le ocurre al peso que indica la báscula cuando el pájaro está volando por la jaula (en comparación con cuando está inmóvil)? Razona tu respuesta.

Enlace con la teoría del conocimiento

Predeterminación

La física clásica sostenía que el futuro del universo se podía predecir a partir del conocimiento del estado presente. ¿Hasta qué punto el conocimiento del presente nos proporciona conocimiento del futuro?

Toda la materia está constituida por partículas. Se ha sugerido que si pudiéramos conocer completamente el estado actual de todas las partículas de un sistema (sus posiciones, energías, movimientos, etc.) tal vez podríamos utilizar las leyes de la física clásica para predecir qué les ocurriría a estas partículas en el futuro. Si estas ideas se pudieran ampliar para incluirlo todo, entonces el futuro del universo ya estaría decidido y **predeterminado**. Los diversos acontecimientos aparentemente impredecibles de la vida diaria y de la conducta humana (como tú mismo leyendo estas palabras en este preciso instante) no serían más que las leyes de la física disfrazadas.

Sin embargo, actualmente sabemos que las leyes de la física (como leyes imaginadas por seres humanos) no siempre están definidas con tanta precisión ni están comprendidas en su totalidad, tal como habían imaginado los primeros físicos. Los principios de la física cuántica contrastan en particular con las leyes de la física clásica. Además, en la práctica es totalmente inconcebible que podamos llegar a saber lo suficiente sobre el estado actual de la totalidad del universo con el objetivo de usar estos datos para realizar predicciones futuras detalladas.

2.3 Trabajo, energía y potencia

El concepto fundamental de energía es la piedra angular sobre la que se construye la ciencia

El concepto de energía es probablemente el concepto que más se utiliza en la ciencia, además de ser un término de uso habitual en el lenguaje diario. A pesar de ello, la idea de energía no es fácil de explicar o de definir, aunque se trate de un concepto muy útil.



Figura 2.94
Los perritos de juguete consiguen su energía de las pilas

Cuando ponemos una pila en un perrito de juguete (Figura 2.94), el perrito se mueve, salta y ladra. Al cabo de un rato, el juguete deja de funcionar. Para intentar *explicar* este fenómeno, ciertamente necesitamos recurrir al concepto de energía. La energía química de la pila se transforma en energía eléctrica, que a su vez se transforma en energía de movimiento mediante un pequeño motor. Parte de la energía también se transforma de energía eléctrica en sonido en un altavoz. Al final, toda la energía útil de la pila se ha transferido al entorno. El concepto «energía» permite explicar el fenómeno observado de una manera relativamente simple.

Podemos hablar de la energía «de» la gasolina que ponemos en el depósito del coche (por ejemplo) y continuar explicando que esta energía se transfiere al movimiento del coche. Pero en realidad no ha fluido nada desde la gasolina al coche; no es más que un modo conveniente de expresar la idea de que la combustión controlada de la gasolina con el oxígeno del aire puede hacer algo que consideramos útil.

Tal vez sea esta la manera más fácil de entender el concepto de energía: la energía se necesita para que ocurran las cosas. Siempre que *algo* cambia hay transferencia de energía de un lugar a otro o de una forma a otra. Y lo que es más importante, esta transferencia de energía se puede *calcular* y supone el «sistema de contabilidad» fundamental de la ciencia. La ocurrencia de un suceso cualquiera requiere una determinada cantidad de energía, y si no hay suficiente energía disponible el suceso no puede ocurrir. Por ejemplo, si no obtienes la energía suficiente (a partir de lo que comes) no podrás subir una colina de 500 m; si no pones suficiente gasolina en el coche no podrás llegar a donde quieres ir; si la energía de un calentador eléctrico no se transforma lo suficientemente rápido, la habitación no se mantendrá caliente cuando hace frío.

El cálculo de las transferencias de energía constituye una parte muy importante de la física, y comenzaremos con situaciones muy habituales en las que la energía se transfiere a los objetos para moverlos.

Trabajo realizado como transferencia de energía

Una forma muy habitual de transferencia de energía es la que se produce cuando se mueve (desplaza) un objeto mediante la aplicación de una fuerza. Esta energía se denomina **trabajo** (símbolo *W*, del inglés «Work»). En física la palabra «trabajo» tiene un significado muy preciso, distinto al que tiene en el lenguaje diario.

trabajo realizado = fuerza x desplazamiento en la dirección de la fuerza

Si la fuerza es constante y tiene la misma dirección que el movimiento podemos escribir:

$W = Fe$

No obstante, en muchos ejemplos puede que no se cumpla uno de estos supuestos o incluso los dos.

La unidad del trabajo es el **julio**, J. Se define 1 J como el trabajo realizado cuando una fuerza de 1 N desplaza un objeto un espacio de 1 m en la dirección de la fuerza. La misma unidad se utiliza para medir *todas* las formas de energía; además, también se utilizan de forma habitual los múltiplos kilojulio (kJ) y megajulio (MJ).

Tanto el trabajo como la energía son magnitudes escalares.

La levantadora de pesas de la Figura 2.95 *no* realiza ningún trabajo sobre las pesas que tiene sobre su cabeza mientras se mantiene inmóvil porque no hay desplazamiento. Pero sí se transfiere energía a sus músculos que, sin duda, le duelen.

Si el movimiento es perpendicular a la fuerza, esta no realiza ningún trabajo. Por ejemplo, la fuerza de la gravedad mantiene a la Luna en órbita alrededor de la Tierra (Figura 2.96), pero no se realiza ningún trabajo.

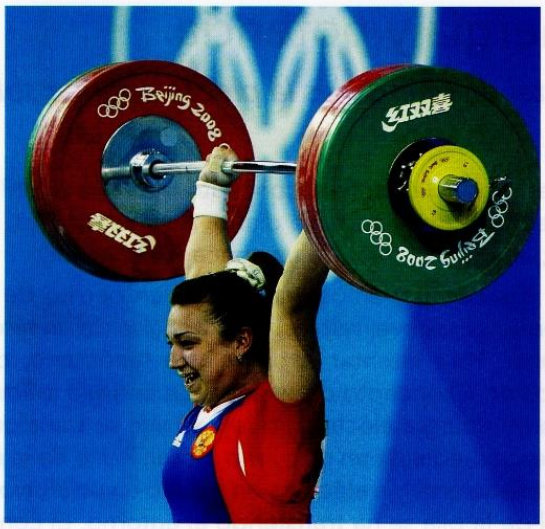


Figura 2.95
Esta levantadora de pesas no está realizando ningún trabajo



Figura 2.96
El mantenimiento en órbita de la Luna alrededor de la Tierra no supone ningún trabajo

Ejemplo resuelto

15 ¿Cuánto trabajo se realiza cuando se levanta una masa de 1,5 kg una altura de 80 cm?

La fuerza necesaria para levantar un objeto (a velocidad constante) es igual a su peso (mg) y el símbolo h se utiliza habitualmente para indicar distancias verticales.

$W = Fe$

$W = mg \times h$

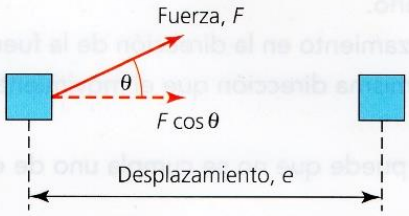
$W = 1{,}5 \times 9{,}81 \times 0{,}80$

$W = 12\ \text{J}$

Cálculo del trabajo realizado cuando la fuerza no está en la misma dirección que el desplazamiento

A veces el desplazamiento producido no está en la misma dirección que la fuerza (Figura 2.97). Por el motivo que sea, el objeto que se representa solo puede desplazarse en la dirección que indica la línea discontinua roja, pero la fuerza actúa en una dirección que forma un ángulo θ con esta línea.

Figura 2.97
Movimiento que no está en la misma dirección de la fuerza aplicada



Sabemos que el trabajo realizado = fuerza x desplazamiento en la dirección de la fuerza. En este caso la fuerza que se utiliza para calcular el trabajo realizado es la *componente* de F en la dirección del movimiento ($F \cos \theta$) de manera que:

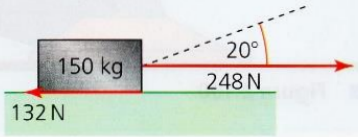
$W = Fe \cos \theta$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Si la fuerza y el movimiento están en la misma dirección, cos θ vale 1 y la ecuación se convierte en $W = Fe$, como al principio. Si la fuerza es perpendicular al movimiento, entonces cos θ vale cero y no hay trabajo realizado.

Ejemplo resuelto

16 La caja de 150 kg que se muestra en la Figura 2.98 se desplaza 2,27 m horizontalmente sobre el suelo gracias a la acción de una fuerza de 248 N que tira de ella.



■ **Figura 2.98**

a ¿Cuánto trabajo realiza la fuerza?

b Si la fuerza de fricción es de 132 N, ¿cuál es la aceleración de la caja?

c Explica por qué sería más fácil desplazar la caja si se tirara de ella en la dirección que indica la línea discontinua.

d Cuando se tira de la caja con un ángulo de 20,0° respecto a la horizontal, la fuerza aplicada es de 204 N. Calcula el trabajo realizado por esta fuerza al desplazar la caja horizontalmente una distancia igual a la del enunciado.

a $W = Fe$

$W = 248 \times 2{,}27 = 563\,\text{J}$

b $a = \dfrac{F}{m}$

$a = \dfrac{(248 - 132)}{150}$

$a = 0{,}773\,\text{m s}^{-2}$

c Cuando se tira de la caja en esta dirección la fuerza tiene una componente vertical que contribuye a reducir la fuerza de reacción normal entre la caja y el suelo. Esto reduce a su vez la fricción que se opone al movimiento horizontal.

d La fuerza no actúa en la misma dirección del movimiento. Para calcular el trabajo realizado necesitamos utilizar la componente horizontal de la fuerza de 204 N.

$W = F\cos 20{,}0° \times e$

$W = 204 \times 0{,}940 \times 2{,}27$

$W = 435\,\text{J}$

98 Calcula el trabajo realizado cuando:

a se tira de una maleta de 12 kg con una fuerza de 54 N y la maleta recorre 1,1 m por el suelo

b se levanta la misma maleta a una altura de 1,1 m.

99 La fuerza que empuja el cochecito de la Figura 2.99 no está en la misma dirección del movimiento. Calcula el trabajo realizado cuando se desplaza el cochecito 90 cm hacia la derecha mediante una fuerza de 36 N que forma un ángulo de 28° con la horizontal.

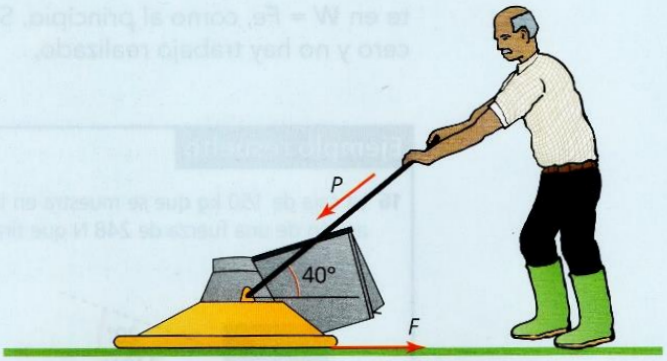


■ **Figura 2.99**

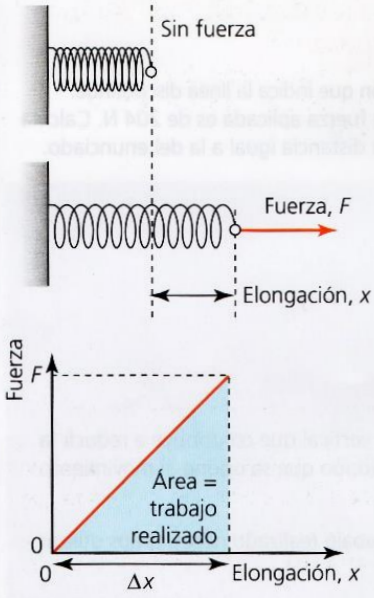
100 El jardinero de la Figura 2.100 está empujando una máquina cortacésped a una velocidad constante de 0,85 m s^{-1} con una fuerza, *P*, de 70 N que forma un ángulo de 40° con el suelo.

a Calcula la magnitud de la fuerza de fricción, *F*.

b ¿Cuánto trabajo se realiza al desplazar la máquina cortacésped durante 3 s?



■ **Figura 2.100**



■ **Figura 2.101**
Fuerza y elongación cuando estiramos un muelle

Cálculo del trabajo realizado por una fuerza variable

Cuando efectuamos cálculos utilizando la ecuación $W = Fe \cos \theta$ el valor de la fuerza debe ser constante pero, en la realidad, esto ocurre muy pocas veces. Para calcular el trabajo realizado por una fuerza *variable* tenemos que hacer primero una estimación del *valor medio* de la fuerza. En algunas situaciones podemos suponer que la fuerza varía de forma predecible y lineal, de modo que su valor medio se encuentra a medio camino entre la fuerza inicial y la fuerza final. El cálculo del trabajo realizado al estirar un muelle puede ser un buen ejemplo de esta situación (Figura 2.101). Suponiendo que el muelle no se haya estirado por encima de su límite de elasticidad, la fuerza aplicada es proporcional a la **elongación** (desplazamiento del extremo del muelle), tal como se muestra en la gráfica fuerza–elongación. (Esta relación se conoce como *ley de Hooke*).

El uso de la ecuación $W = Fe$ en esta situación implica el uso de la fuerza *media* durante la elongación del muelle. Cuando el muelle se alarga, la fuerza aumenta linealmente desde cero hasta *F* y su valor medio es *F*/2. El trabajo realizado, *W*, es (*F*/2) x Δ*x*. (El símbolo *x* se utiliza normalmente para representar la elongación y Δ*x* se utiliza para representar un cambio en la elongación).

El resultado de este cálculo es *siempre* idéntico al del área sombreada de la gráfica. Si conocemos cómo varía la fuerza respecto al desplazamiento podemos dibujar una curva fuerza–desplazamiento y entonces:

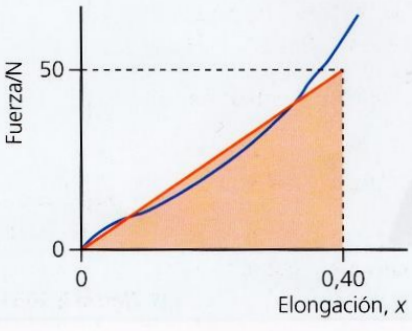
El área bajo la curva fuerza–desplazamiento (distancia) equivale al trabajo realizado.

La utilidad de la determinación del trabajo realizado a partir del área bajo la curva se ve más claramente cuando consideramos el estiramiento de un material como el caucho, para el que el desplazamiento *no* es proporcional a la fuerza. Normalmente el caucho se vuelve más rígido a medida que se estira. En la Figura 2.102 se muestra una posible curva fuerza–elongación (desplazamiento) para el caucho.

El trabajo realizado, *W*, para estirar el caucho 40 cm (por ejemplo) se puede calcular a partir del área bajo la curva. Esta área, a su vez, se puede estimar a partir del triángulo sombreado que, a ojo, tiene un área similar:

$W = 0{,}5 \times 50 \times 0{,}40 = 10\,\text{J}$

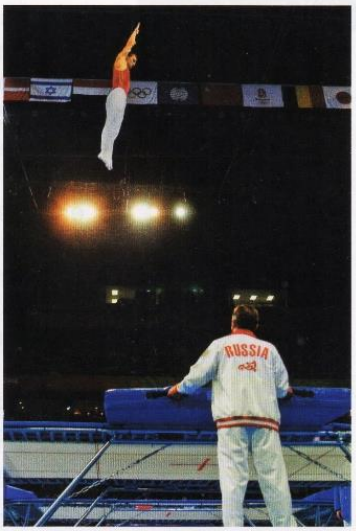
■ **Figura 2.102**
Curva fuerza–elongación (desplazamiento) para un material de caucho sometido a tensión



Ejemplo resuelto

17 a El centro de gravedad de un saltador de cama elástica de masa 73 kg se eleva una altura vertical de 2,48 m cuando salta (véase Figura 2.103). Calcula el trabajo realizado.

b Cuando el saltador cae sobre la cama elástica tras el salto, descansa un momento antes de impulsarse hacia arriba de nuevo. Si el desplazamiento máximo (estiramiento) de la cama elástica es 0,8 m, dibuja esquemáticamente una curva fuerza–desplazamiento para la superficie de la cama elástica.

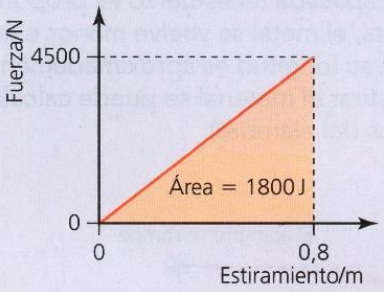


■ **Figura 2.103**
Cuanto más se estira la cama elástica, más alto puede saltar el saltador

a $W = Fe$ = peso x altura = $mg \times h$

$W = 73 \times 9{,}81 \times 2{,}48 = 1\,800\,\text{J}$

b La forma de la curva es desconocida, de manera que se ha dibujado de forma lineal por simplicidad (Figura 2.104). El área bajo la curva debe ser aproximadamente igual a 1 800 J (sin tener en cuenta la transferencia hacia otras formas de energía). Esto implica que la fuerza máxima debe ser de unos 4500 N, de manera que 0,5 x 0,8 x 4500 = 1 800 J.



■ **Figura 2.104**

101 Cuando no se le aplica ninguna fuerza, un muelle tiene una longitud de 48 mm. Cuando se le aplica una fuerza de 8,3 N su longitud total se alarga hasta 74 mm. ¿Cuánto trabajo se ha realizado sobre el muelle (suponiendo que obedece la ley de Hooke)?

102 Algunos muelles están diseñados para comprimirse, además de estirarse. El sistema de suspensión de un coche es un buen ejemplo de ello.

a Estima el valor de la máxima fuerza que puedes ejercer sobre un coche y el máximo desplazamiento que experimentará el coche como consecuencia de tu fuerza.

b Calcula aproximadamente el trabajo realizado sobre los muelles del sistema de suspensión.

103 Una tira fina de plástico se estira al colgarle masas de 100 g en su extremo. Cuando la masa total que cuelga de la tira es menor de 0,800 kg, la elongación de la tira es proporcional a la fuerza de estiramiento. Cuando la masa que cuelga es exactamente 0,800 kg, la elongación de la tira es de 14 cm. A medida que se le cuelga más masa, el plástico se vuelve más flexible pero acaba rompiéndose cuando la masa total que cuelga de él es de 1,2 kg y se ha alargado hasta 30 cm, sin recuperar ya su forma original.

a Esboza una curva fuerza–distancia que represente el comportamiento de la tira de plástico.

b Estima el trabajo total realizado para estirar el plástico:

i 14 cm

ii 30 cm.

c Sugiere qué le ocurre a la energía transferida durante el estiramiento del plástico.

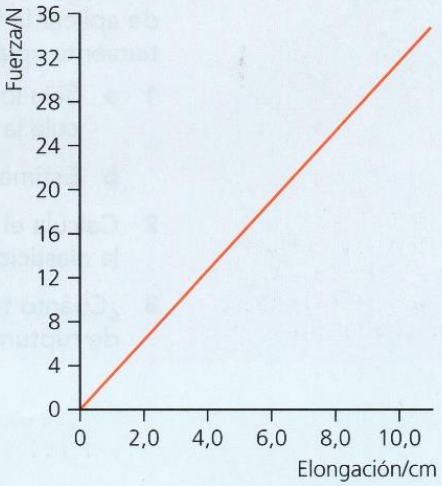
104 Una pendiente escarpada en una curva fuerza–elongación (F–e) significa que se necesita una fuerza mayor para alargar el muelle una determinada cantidad. En otras palabras, la pendiente de la curva fuerza–elongación representa la *elasticidad* del muelle. $\Delta F/\Delta e$ es lo que se conoce como *constante de elasticidad* del muelle, pero un concepto similar se puede aplicar al estiramiento de otros materiales, no necesariamente muelles.

a Calcula la constante de elasticidad del muelle representado en la Figura 2.105.

b ¿Cuál es el trabajo realizado para alargar el muelle 8,0 cm?

c Si la longitud original del muelle es de 27,0 cm, ¿cuál será su longitud si se le aplica una fuerza de 19 N?

d Explica por qué no sería una buena idea utilizar la información de esta gráfica para predecir la longitud del muelle si se le cuelga de su extremo una masa de 10 kg.



■ **Figura 2.105**

Perspectivas adicionales

Fuerza y elongación: esfuerzo y deformación

Se pueden representar curvas de fuerza–elongación para muestras de distintos materiales (normalmente en forma de alambre). Estas curvas proporcionan una importante información básica sobre la *elasticidad* y la *resistencia* de la muestra que se está examinando, así como su posible deformación y su capacidad para almacenar energía cuando está siendo sometida a estiramiento. Evidentemente todas estas características no solo dependen del material del que está hecha la muestra sino también de su longitud original y su sección transversal. Sin embargo, si en lugar de trabajar con curvas de fuerza–desplazamiento lo hacemos con curvas de esfuerzo y deformación, los resultados pueden aplicarse a muestras de un mismo material pero con *cualquier* forma.

$$\text{esfuerzo} = \frac{\text{fuerza}}{\text{área}} \qquad \text{deformación} = \frac{\text{cambio en la longitud}}{\text{longitud original}}$$

Como ejemplo consideremos la Figura 2.106a, en la que se muestra la relación de esfuerzo–deformación para un alambre hasta el momento en que se rompe.

A partir de esta gráfica podemos establecer las conclusiones siguientes sobre este metal:

- Para deformaciones hasta de 0,05 (5%) aproximadamente, cualquier elongación producida es proporcional a la fuerza aplicada (el esfuerzo es proporcional a la deformación).
- Cuando el esfuerzo aumenta, el metal se vuelve menos elástico.
- Cuando el metal se rompe, su longitud es aproximadamente el doble de la longitud original.
- El trabajo realizado para estirar el material se puede calcular a partir del área bajo la curva (si se conocen las dimensiones del alambre).

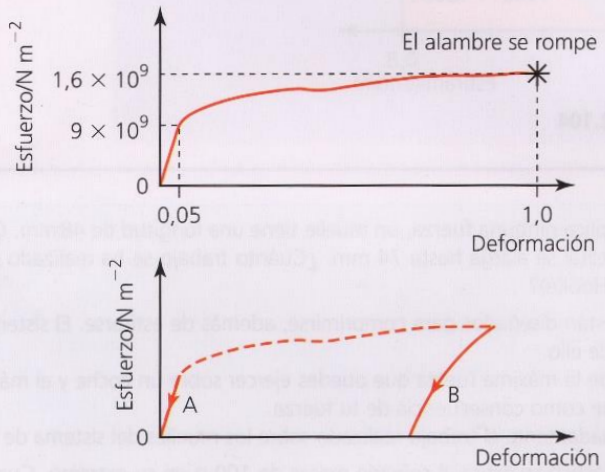


Figura 2.106 *Gráfica de esfuerzo–deformación*

En la Figura 2.106b podemos ver lo que le ocurre al mismo metal cuando *se deja de aplicar* la fuerza sobre él en dos situaciones distintas. En A la fuerza máxima sobre el alambre no lo lleva más allá de su límite de proporcionalidad y el alambre retorna a su forma original. Es lo que se denomina «comportamiento elástico».

En B, el alambre se ha seguido estirando durante más tiempo antes de que se haya dejado de aplicar la fuerza y queda permanentemente deformado. Es lo que se conoce como comportamiento «plástico».

1 a Si la longitud original del alambre es 1,20 m y su sección transversal es $3{,}8 \times 10^{-8}\,m^2$, calcula la fuerza necesaria para romper el alambre y su longitud justo antes de romperse.

b Estima la fuerza necesaria para romper otro alambre del mismo metal de longitud 2,4 m.

2 Calcula el cociente esfuerzo/deformación para la sección lineal de la gráfica. Este cociente es la elasticidad del metal. ¿Cuáles son las unidades de la elasticidad?

3 ¿Cuánto trabajo se ha realizado aproximadamente para estirar este alambre hasta su punto de ruptura?

Distintas formas de energía

Cuando algo ocurre (es decir, algo cambia) es porque ha habido una transferencia de energía desde una forma de energía a otra, o desde un lugar a otro. Es importante que tengamos una idea general de cuáles son las principales formas de energía. En esta sección introduciremos brevemente las siguientes:

- energía (potencial) gravitatoria
- energía (potencial) nuclear
- energía (potencial) química
- energía (potencial) eléctrica y energía transferida mediante una corriente eléctrica
- energía (potencial) de deformación elástica
- energía térmica (calor)
- energía radiante
- energía cinética (incluyendo la energía eólica)
- energía interna
- energía debida a ondas mecánicas (incluyendo las ondas acústicas y las ondas acuáticas).

(Aunque no forma parte de los contenidos de este capítulo, es interesante recordar que cualquier masa tiene un contenido de energía equivalente a su magnitud. La masa y la energía están relacionadas por la famosa ecuación de Einstein $E = mc^2$. Esta ecuación se explica en el Capítulo 7).

Energías potenciales

Cuando efectuamos un trabajo para estirar un muelle (véase Figura 2.101), decimos que hemos transferido energía al muelle y que esta energía transferida se encuentra en forma de energía (de deformación) potencial elástica. (Comportamiento **elástico** significa que el material vuelve a su forma original cuando se deja de aplicar la fuerza sobre él. Cuando decimos que el material se ha **deformado** significa que ha cambiado de forma). Cuando estiramos un muelle podemos afirmar que se «almacena» energía en su interior y que esta energía está disponible para su uso posterior, posiblemente para algo útil como hacer funcionar un juguete o un reloj de cuerda. La energía potencial elástica es solo una más entre las muchas formas de energía potencial.

Las **energías potenciales** son energías almacenadas. En general, existe energía potencial cuando hay fuerzas entre los objetos. A continuación se enumeran distintas energías potenciales, todas ellas importantes:

- Cuando levantamos una masa en contra de la ley de la gravedad decimos que la masa ha ganado **energía potencial gravitatoria**. Esta energía se almacena en la masa. Si la masa se deja caer pierde energía potencial gravitatoria, que puede ser transferida para realizar algo útil.
- La **energía (potencial) nuclear** está asociada a las fuerzas existentes entre las partículas de los núcleos de los átomos.
- La **energía (potencial) química** está asociada a las fuerzas existentes entre los electrones y otras partículas atómicas y moleculares.
- La **energía (potencial) eléctrica** está asociada a las fuerzas entre las cargas eléctricas.
- La **energía (potencial) de deformación elástica** está asociada a las fuerzas necesarias para cambiar la forma de los objetos.

Energía cinética

Para mover un objeto que está en reposo o para moverlo más rápidamente hay que efectuar un trabajo. Esto significa que todos los objetos que están en movimiento tienen una forma de energía, que se denomina **energía cinética**. («Cinética» significa relativa al movimiento). La energía eólica es la energía cinética del aire en movimiento.

Energía transferida

Cuando decimos que se transfiere energía de un lugar a otro, podemos estar refiriéndonos a las formas de energía siguientes:

- **energía eléctrica** transportada por una corriente eléctrica
- **energía térmica** (calor) transferida como consecuencia de una diferencia de temperatura

- **energía radiante** transferida por ondas electromagnéticas (la «energía luminosa» o la «energía solar» son ejemplos específicos de energía radiante electromagnética)
- las **ondas mecánicas** (como las ondas acuáticas y las ondas acústicas) implican la oscilación de masas y combinan energía cinética y energía potencial (véase Capítulo 4).

Energía interna

Dentro de una sustancia hay una gran cantidad de energía que proviene de los movimientos aleatorios de las partículas que contiene y de las fuerzas de interacción entre estas partículas. La **energía interna** de una sustancia es la suma de la energía cinética aleatoria total más la energía potencial eléctrica total del conjunto de partículas que contiene la sustancia.

Cuando los objetos se mueven en situaciones cotidianas, parte o la totalidad de su energía cinética se transforma en energía interna a causa de las fuerzas de fricción (y como consecuencia se desprende energía térmica al entorno).

Ejemplos de transferencia de energía

Todo lo que ocurre en nuestras vidas comporta transferencias de energía, por tanto, no hay que buscar demasiado lejos para encontrar ejemplos. Cuando encendemos un ventilador, la energía procedente de la corriente eléctrica se transforma en energía cinética del ventilador que, a su vez, se transforma en movimiento del aire. Cuando apagamos el ventilador, toda la energía se habrá desprendido al entorno en forma de energía térmica y después energía interna. Pero, ¿de dónde obtiene la energía la corriente eléctrica? Tal vez en una central eléctrica cercana la energía térmica del petróleo se transforma en energía interna y energía cinética del vapor, que se convierte a continuación en energía cinética en las turbinas que generan la electricidad.

La mayor parte de la energía que utilizamos en nuestro planeta proviene del Sol. La energía nuclear de los núcleos de hidrógeno del Sol se convierte en energía interna y radiación. La radiación solar que llega a la Tierra se transforma en energía química en las plantas (y después en los animales). El petróleo proviene de los restos de plantas y pequeños organismos que vivieron hace millones de años y que se han descompuesto en ausencia de oxígeno.

Ejemplo resuelto

18 Describe las transferencias de energía que se producen cuando se cuelga una masa verticalmente del extremo de un muelle metálico, que puede moverse arriba y abajo (oscilar) libremente, hasta que deja de moverse.

Cuando se comprime o se estira un muelle hay cambios en la energía potencial elástica. Cuando la masa se desplaza hacia arriba o hacia abajo hay transferencias de energía potencial gravitatoria. Cuando el muelle y la masa pierden energía potencial, la masa gana energía cinética. Cuando la energía cinética se vuelve a transformar en energía potencial, la masa pierde energía cinética. Parte de la energía se transfiere continuamente al entorno en forma de energía térmica, de modo que al cabo de un tiempo el movimiento se detiene.

105 Dibuja un diagrama de flujo donde se representen todas las transferencias de energía que se enumeran en el párrafo anterior.

106 Nombra aparatos cuyo cometido principal consista en llevar a cabo las transformaciones de energía siguientes:

a electricidad a sonido
b energía química a electricidad
c energía nuclear a electricidad
d sonido a electricidad
e energía química a radiación electromagnética
f energía química a energía cinética
g deformación elástica a energía cinética
h energía cinética a electricidad
i energía química a energía interna
j radiación electromagnética a electricidad.

Principio de conservación de la energía

El estudio de las distintas formas de energía y sus transferencias es un tema central de la física. El principal motivo por el que el concepto de energía es tan importante radica en el **principio de conservación de la energía**. («Conservar» significa mantener igual).

El **principio de conservación de la energía** afirma que la energía no se puede crear ni destruir; solo se puede transferir de una forma a otra.

En otras palabras, la cantidad total de energía del universo es constante. Se trata probablemente del principio más importante de la ciencia. Si en una determinada situación parece que la energía simplemente ha aparecido o desaparecido, sabemos que debe existir algún tipo de explicación del lugar de donde viene o el lugar a donde va. Es conveniente remarcar que todos los procesos cotidianos desprenden (**disipan**) algo de energía al entorno y que, aunque esta energía disipada ya no sea útil, no por ello ha «desaparecido».

La aplicación del principio de conservación de la energía exige poder medir y calcular transferencias de energía. Todos los estudiantes de física deben conocer las ecuaciones para calcular cantidades de energía en todas sus formas (véase el apartado siguiente).

Naturaleza de la ciencia

La importancia de la conservación de la energía

A pesar de su considerable importancia y de su gran alcance, el principio de la conservación de la energía no puede ser verificado directamente mediante experimentos individuales. Demostrar que un principio físico (ley/teoría) es *siempre* cierto, para *cualquier* proceso, en *cualquier* lugar y en *cualquier* momento es simplemente imposible. Todos los procesos mecánicos disipan energía hacia el entorno, por tanto resulta difícil cuantificar hacia dónde va la energía. Así, es comprensible que se haya tardado tantos años en establecer completamente el principio de conservación de la energía. Sin embargo, una vez establecido no hay ningún experimento que lo haya contradicho, aunque el concepto original de energía se ha tenido que adaptar y ampliar a lo largo del tiempo para incluir el calor y la masa.

Cálculo de energías mecánicas

Energía potencial gravitatoria

Cuando alzamos una masa le transferimos energía y, como estamos ejerciendo una fuerza para desplazarla, este tipo de energía se puede describir como un ejemplo de trabajo realizado. Ya hemos visto (en el Ejemplo resuelto 17) que podemos calcular este trabajo realizado mediante la expresión $W = mgh$. La diferencia de energía asociada a una masa, por el hecho de que se haya realizado un trabajo para desplazarla hacia arriba o hacia abajo hasta una nueva posición, se denomina *cambio en* la energía potencial gravitatoria (Figura 2.107).

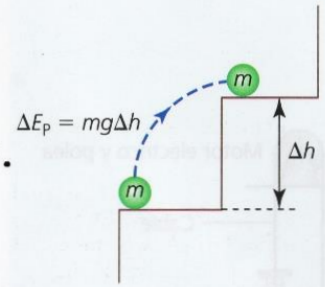


Figura 2.107
Esta masa está ganando energía potencial gravitatoria

El símbolo E se utiliza para representar la energía en general, y el símbolo E_p para representar la energía potencial gravitatoria en particular. Cuando levantamos una masa m una altura vertical h (como se muestra en la Figura 2.107), podemos calcular el cambio en la energía potencial gravitatoria, E_p, mediante la ecuación:

$$\Delta E_P = mg\Delta h$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Fíjate en que esta ecuación nos permite calcular cambios en la energía potencial gravitatoria entre diversas posiciones. Si quisiéramos calcular la energía gravitatoria «total» de una masa, tendríamos que responder primero a la pregunta: ¿energía potencial gravitatoria en comparación con qué? La respuesta podría ser con el suelo, el nivel del mar o el centro de la Tierra, por poner un ejemplo. Hablaremos de ello más adelante, en el Capítulo 10.

Ejemplo resuelto

19 ¿Cuánta energía potencial gravitatoria se gana en cada una de estas situaciones?

a Levantar un libro de 818 g a una altura de 91 cm, desde el suelo a un escritorio.

b Un muchacho de 59 kg sube 18 escalones de 14 cm de altura cada uno para subir del primer al segundo piso de un edificio.

c El mismo muchacho baja del segundo piso al primero.

a $\Delta E_P = mg\Delta h$

$\Delta E_P = 0{,}818 \times 9{,}81 \times 0{,}91$

$\Delta E_P = 7{,}3\,\text{J}$

b $\Delta E_P = mg\Delta h$

$\Delta E_P = 56 \times 9{,}81 \times (18 \times 0{,}14)$

$\Delta E_P = 1400\,\text{J}$

c $-1\,400\,\text{J}$

El signo negativo indica que la energía potencial gravitatoria es menor que en el segundo piso.

107 **a** ¿Cuál es la diferencia de energía potencial gravitatoria de un escalador de 74 kg entre la cima y la base de una montaña de 2800 m de altura?

b ¿Es igual la intensidad del campo gravitatorio en la cima y en la base de la montaña? Si no es igual, ¿afecta a la respuesta del apartado **a**?

108 Un teleférico recorre una distancia de 6 km a una altura de 700 m (Figura 2.108).



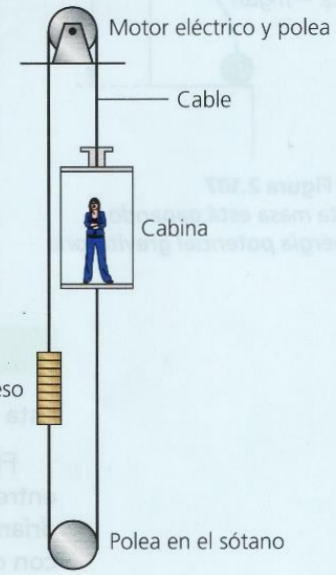
■ **Figura 2.108** *Teleférico de Ngong Ping en Hong Kong*

a ¿Cuánta energía potencial gravitatoria se debe transferir al funicular de masa 1800 kg durante el trayecto, si lleva ocho pasajeros con una masa media de 47 kg cada uno?

b En realidad la transferencia de energía para recorrer el trayecto ha de ser mucho mayor que la que has calculado en el apartado **a**. Intenta explicarlo.

109 **a** ¿Cuánta energía gravitatoria se transfiere a un ascensor de masa total 2340 kg cuando sube 72 pisos con una altura media de 3,1 m cada uno?

b Cuando vuelve a bajar, se transfiere la misma cantidad de energía potencial gravitatoria desde el ascensor. Los ascensores utilizan contrapesos (véase Figura 2.109). Cuando el ascensor baja, el contrapeso sube y viceversa. Explica la ventaja de este sistema. Las vías de funicular normalmente llevan dos vagones: mientras uno sube, el otro baja.



■ **Figura 2.109**
Un ascensor y su contrapeso

Energía cinética

Consideremos una masa m que es acelerada uniformemente desde el estado de reposo por una fuerza, F, que actúa en la dirección del movimiento a lo largo de una distancia e. El trabajo realizado se puede calcular mediante $W = Fe$. Pero $F = ma$ y $v^2 = u^2 + 2ae$ (con $u = 0$), por tanto la ecuación anterior se puede reescribir:

$$W = Fe = ma \times \frac{v^2}{2a} = \frac{1}{2}mv^2$$

Es decir, la energía cinética de una masa en movimiento, E_c, se puede calcular a partir de:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Ejemplo resuelto

20 Calcula la energía cinética de un coche de masa 1320 kg que viaja a 27 m s^{-1}.

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$
$$E_c = \frac{1}{2} \times 1320 \times 27^2$$
$$E_c = 4{,}8 \times 10^5 \text{ J}$$

110 **a** Calcula la energía cinética de:
- **i** una pelota de fútbol (masa 440 g) que adquiere una velocidad de 24 m s^{-1} después de un puntapié
- **ii** una bala de 24 g que se mueve a 420 m s^{-1}.

b Estima la energía cinética de una velocista femenina en una carrera olímpica de 100 m lisos.

111 Una masa de 2,4 kg en movimiento tiene una energía cinética de 278 J. ¿Cuál es su velocidad?

112 La masa de un electrón es $9{,}1 \times 10^{-31}$ kg. Si se desplaza al 1% de la velocidad de la luz, ¿cuál es su energía cinética? (Velocidad de la luz = $3{,}00 \times 10^8$ m s^{-1})

113 Un coche que viaja a 10 m s^{-1} tiene una energía cinética de 100 kJ. Si su velocidad aumenta hasta 30 m s^{-1}, ¿cuál es su nueva energía cinética?

Energía potencial elástica

En la Figura 2.101 y la Figura 2.102 se representan las curvas fuerza–elongación correspondientes al estiramiento de un muelle u otro material; el área bajo la curva equivale al trabajo realizado por la fuerza durante el estiramiento (energía transferida).

Si el muelle (o el material que sea) se estira de forma elástica, cuando se deja de aplicar la fuerza recupera su forma y la energía transferida de nuevo se puede utilizar para hacer algo útil. Esta energía almacenada se denomina *energía potencial elástica* y, tal como se explicó anteriormente, equivale al área bajo la curva. El concepto de energía potencial elástica es especialmente útil para explicar el comportamiento y la utilidad de los muelles y del caucho.

Si la fuerza de estiramiento, F, es proporcional a la elongación, x, como se muestra en la Figura 2.101, entonces el gradiente

$$\frac{F}{\Delta x} = \text{constante, } k$$

donde k se conoce como **constante de fuerza** del muelle (o el material que sea). A veces también se utiliza el término «constante elástica del muelle». Las unidades de k son N m^{-1} (o N cm^{-1}). Un valor elevado de la constante de fuerza significa que el muelle/material es más rígido (se necesita más fuerza para producir la misma elongación). Una constante de fuerza elevada se representa mediante una curva más escarpada.

Consideremos de nuevo la curva de la Figura 2.101, en la que la fuerza es proporcional a la elongación y una fuerza F produce una elongación Δx. La ecuación para la energía potencial elástica, E_p, se puede determinar considerando el área del triángulo bajo la curva hasta aquel punto:

$$E_P = \frac{1}{2}F\Delta x$$

y como:

$$F = k\Delta x$$

$$E_P = \frac{1}{2}k\Delta x^2$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Esta ecuación no se puede utilizar si la fuerza *no* es proporcional a la elongación, pero en este caso la energía transferida se puede calcular a partir de una estimación del área. Sin embargo, la energía potencial elástica útil suele estar asociada a un estiramiento proporcional, como el de un muelle que no se ha estirado tanto como para superar su capacidad elástica. Las curvas fuerza–elongación no lineales normalmente representan materiales que no vuelven a su forma original cuando se deja de aplicar la fuerza, de manera que gran parte de la energía que ha sido transferida en el proceso de estiramiento ya no puede ser almacenada y recuperada posteriormente. (La energía tiende a calentar el material). El caucho constituye una importante excepción (véase la Figura 2.102).

Ejemplo resuelto

21 Cuando se aplica una fuerza de 38,2 N a un muelle de acero, su longitud aumenta linealmente desde 23,7 cm hasta 34,1 cm.

a Calcula la constante de fuerza del muelle.

b Calcula la longitud del muelle si la fuerza se reduce hasta 22,4 N.

c Calcula el valor de la elongación producida por una fuerza de 50,0 N. ¿Por qué es poco fiable tu respuesta?

d ¿Cuánta energía potencial elástica se almacena en el muelle:

i cuando su elongación es de 5,9 cm?

ii cuando la fuerza es de 7,6 N?

e Explica por qué cuando se duplica la fuerza de estiramiento la consecuencia es que la energía potencial elástica almacenada se cuadriplica.

a $k = \frac{F}{\Delta x} = \frac{38{,}2}{(0{,}341 - 0{,}237)} = 367\,\text{N m}^{-1}$

b $\Delta x = \frac{F}{k} = \frac{22{,}4}{367} = 0{,}0610\,\text{m}$

Si añadimos este valor a la longitud original (antes del estiramiento) de 0,237 m, la longitud total es de 0,298 m.

c $\Delta x = \frac{F}{k} = \frac{50{,}0}{367} = 0{,}136\,\text{m}$

Este valor es poco fiable porque no sabemos si la elongación del muelle todavía es proporcional a esta fuerza (tiene mayor intensidad que la de la pregunta original).

d $E_p = \frac{1}{2}k\Delta x^2$

$= \frac{1}{2} \times 367 \times 0{,}059^2 = 0{,}64\,\text{J}$

e $x = \frac{F}{k} = \frac{7{,}6}{367} = 0{,}021\,\text{m}$

$= \frac{1}{2} \times 367 \times 0{,}021^2 = 0{,}081\,\text{J}$

f Si la elongación es proporcional a la fuerza, cuando duplicamos la fuerza también se tiene que duplicar la elongación.

114 Describe (incluyendo un diagrama apropiado) cómo realizarías un experimento para determinar la constante de fuerza de un muelle.

115 **a** Si un muelle tiene una constante de fuerza de 134 N m^{-1}, ¿qué elongación produce una fuerza de 10 N sobre el muelle? (Supón que el muelle no se estira por encima de su capacidad elástica.)

b ¿Cuánta energía potencial elástica se almacena en el muelle con esta fuerza?

c ¿Qué fuerza habría que aplicar al muelle para que almacenara una energía potencial elástica de 1,51 J?

116 Estima la cantidad de energía potencial elástica que se almacena en el sistema de suspensión de un coche cuando se montan en él los cuatro miembros de una familia.

Aplicaciones

Facilitar el trabajo

Cuando levantamos un objeto (verticalmente) la cantidad de energía (potencial gravitatoria) que necesitamos transferirle viene dada únicamente por su peso y por la altura vertical (*mgh*). Por ejemplo, para levantar una masa de 100 kg a una altura de 1 m hace falta realizar un trabajo de unos 1000 J. Aunque no se trata de un trabajo excesivo en cuanto a cantidad, no significa que podamos realizarlo fácilmente.

Existen dos razones principales por las que este trabajo podría ser difícil. En primer lugar, es posible que no podamos transferir esta cantidad de energía en el tiempo requerido para realizar el trabajo. Diciéndolo de otro modo, es posible que no seamos lo suficientemente *potentes*. (El concepto de potencia se trata más adelante en este capítulo). En segundo lugar, puede que no seamos lo bastante *fuertes* porque no somos capaces de proporcionar la fuerza ascendente necesaria de unos 1000 N. Potencia y fuerza son dos conceptos que se confunden en el lenguaje habitual.

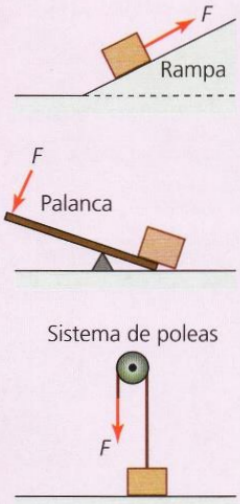


Figura 2.110
Máquinas simples

El levantamiento de pesos (pesados) es una actividad humana muy habitual, de modo que hace ya muchos años que se han inventado diversos tipos de «máquinas» simples para facilitar este tipo de trabajos reduciendo la fuerza necesaria para llevarlos a cabo. Estas máquinas son la rampa (*plano inclinado*), la *palanca* y la *polea* (Figura 2.110).

En todas estas máquinas simples se reduce la fuerza necesaria para realizar el trabajo a costa de desplazar la fuerza. Si no hubiera pérdidas de energía (prácticamente todas son debidas a la fricción) el trabajo realizado por la fuerza (*Fe*) equivaldría a la energía útil transferida al objeto que está siendo levantado (*mgh*). Como en la práctica hay pérdidas de energía, tenemos que transferir más energía utilizando una máquina que levantando directamente el peso sin ella. Pero esto no es problema porque normalmente nos preocupa más la facilidad a la hora de realizar el trabajo que la energía total necesaria o la eficiencia del proceso.

1 En la Figura 2.111 se muestra un gato levantando el lateral de un coche.

a Estima cuánta energía gravitatoria se le debe transferir al coche para cambiar un neumático.

b Si se cambia el diseño del gato en teoría es posible levantar el coche sin hacer apenas fuerza. Estima un valor de la fuerza que todo el mundo estaría dispuesto a hacer para levantar un coche con un gato.

c Utiliza las respuestas a los apartados **a** y **b** para estimar cuánto se debe desplazar la fuerza para levantar el coche.

d Explica cómo se puede desplazar la fuerza a una distancia mayor.



Figura 2.111
Cambio de un neumático utilizando una máquina simple (gato)

e Razona si puede ser útil que haya mucha fricción cuando se utiliza un gato para levantar un coche.

Transferencias mecánicas de energía

Hasta ahora en este capítulo hemos introducido importantes ecuaciones para cuatro tipos distintos de energía mecánica:

- Trabajo realizado (energía transferida) cuando una fuerza desplaza un objeto:
  $W = Fe$
- Energía cinética de un objeto en movimiento:
  $E_c = \frac{1}{2}mv^2$

- Cambios en la energía potencial gravitatoria cuando un objeto se mueve hacia arriba o hacia abajo:

$$\Delta E_P = mg\Delta h$$

- Energía potencial elástica cuando algo es deformado elásticamente:

$$E_P = \frac{1}{2}k\Delta x^2$$

Cuando se produce un cambio en el movimiento de un objeto se produce una transferencia energética entre estas cuatro formas de energía, de modo que podemos igualar las ecuaciones apropiadas para predecir qué ocurrirá, tal como se muestra en los ejemplos siguientes. Para ello necesitamos suponer que no se produce transferencia hacia otras formas de energía (como energía térmica o energía interna). Es decir, debemos considerar que la fricción y/o la resistencia del aire son despreciables.

1 Energía potencial gravitatoria/energía cinética

Cuando un objeto cae hacia el suelo se produce una transformación de energía potencial gravitatoria en energía cinética. Cuando lanzamos o proyectamos un objeto verticalmente hacia arriba hemos de suministrarle energía cinética, que se transforma a continuación en energía potencial gravitatoria. En el punto más alto de la trayectoria, la energía cinética del objeto será cero y la energía potencial gravitatoria será máxima.

Supongamos que un objeto de masa m cae desde un estado de reposo y se mueve a través de una altura vertical, h, sin resistencia del aire. Podemos escribir:

$$\Delta E_P = E_c$$

$$mg\Delta h = \frac{1}{2}mv^2_{max}$$

y en consecuencia:

$$v^2_{max} = 2g\Delta h$$

Esta útil ecuación equivale a la ecuación del movimiento: $v^2 = u^2 + 2ae$, con $u = 0$, $a = g$ y $e = h$. La misma ecuación se puede utilizar para un objeto que se mueve hacia arriba. También se puede utilizar para objetos que suben o bajan por una pendiente (sin rodar), pero siempre suponiendo que la fricción es despreciable.

Los experimentos para medir la velocidad máxima de un objeto que cae verticalmente desde una altura conocida demuestran que, en la práctica, la ganancia de energía cinética es menor que la pérdida de energía potencial gravitatoria. Esta diferencia puede proporcionar alguna información sobre las fuerzas de resistencia del aire que actúan sobre el objeto que cae. En la Figura 2.112 se representa un experimento relacionado con lo que acabamos de decir y en el que una masa que cae, m, tira de otra masa, M, por una mesa horizontal. En este caso es posible que la resistencia del aire sea insignificante, pero las fuerzas de fricción probablemente no lo son. Ambas masas ganan energía cinética.

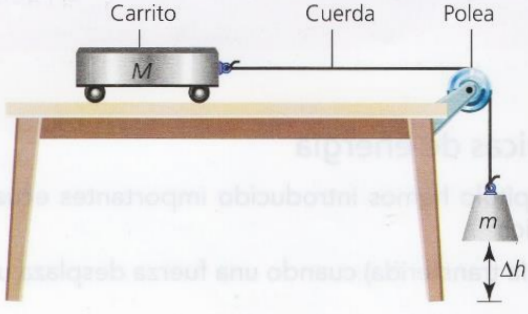


Figura 2.112
Transferencia de energía potencial gravitatoria en energía cinética

Ejemplos resueltos

22 Se deja caer una pelota desde una altura de 18,3 m. ¿Con qué velocidad impactará contra el suelo? ¿Qué supuestos has considerado para efectuar este cálculo?

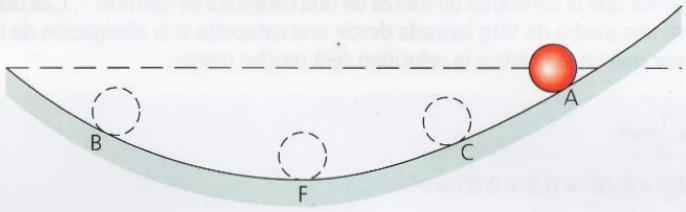
$v^2_{max} = 2g\Delta h$

$v^2_{max} = 2 \times 9{,}81 \times 18{,}3$

$v_{max} = 18{,}9\,m\,s^{-1}$

Hemos supuesto que no hay energía disipada a causa de la resistencia del aire. Fíjate en que esta pregunta se podría haber formulado de una manera distinta: ¿con qué velocidad se tendría que lanzar una pelota verticalmente hacia arriba para que alcance una altura de 18,3 m?

23 La pelota que se muestra en la Figura 2.113 se ha dejado caer desde un estado de reposo en la posición A. La pelota se acelera bajando por la pendiente y alcanza su velocidad máxima en el punto más bajo, F. A continuación sube por la otra cara de la pendiente y alcanza su altura máxima en el punto B.



■ **Figura 2.113**

a Explica por qué el punto B está más abajo que el punto A.

b Describe el movimiento de la pelota tras abandonar la posición B y explica las transferencias de energía que tienen lugar hasta que finalmente se queda en reposo en el punto F.

a Cuando la pelota rueda hacia delante y hacia atrás se produce una transferencia continua de energía potencial gravitatoria en energía cinética. La pelota solo podría alcanzar la misma altura A y volver a ganar toda la energía potencial gravitatoria si no hubiera fricción. Pero sí la hay y, por tanto, parte de la energía cinética de la pelota en movimiento es transferida en forma de energía interna de la pelota y de la pendiente. En consecuencia, la pelota no puede volver a alcanzar la misma altura A.

b La pelota se acelera a medida que baja por la pendiente. Cuando llega al punto F, toda la energía potencial gravitatoria adicional que tenía por su posición a una altura B ha sido transferida en forma de energía cinética, y la pelota alcanza su velocidad máxima en F. A medida que la pelota se desplaza hacia C su energía cinética vuelve a transformarse en energía potencial gravitatoria y la pelota se decelera. Además, siempre que la pelota se mueve, parte de la energía se transforma en energía interna, de modo que la altura máxima y la velocidad máxima de la pelota son cada vez menores. Al final, la pelota se acaba parando en el punto F.

2 Energía potencial elástica/energía cinética

En ocasiones podemos utilizar la energía almacenada en un muelle o en una cinta elástica para proporcionar energía cinética a un objeto y proyectarlo por el suelo o por el aire. En la Figura 2.114 se muestra un experimento en el que se utiliza una cuerda elástica para proyectar un carrito a través de una superficie horizontal. Cuando se deja de aplicar la fuerza, el carrito se mueve hacia la derecha a medida que la cuerda elástica recupera su forma. Se puede estudiar el efecto de la variación de la fuerza, la elongación de la cuerda elástica y la masa del carrito sobre la velocidad inicial del carrito.



■ **Figura 2.114**
Proyección de un carrito mediante el estiramiento de una cuerda elástica

Cuando disparamos una flecha con un arco se produce el mismo tipo de transferencia de energía a partir de energía potencial elástica. Si suponemos que la fuerza de estiramiento es proporcional a la elongación que produce, este tipo de transferencia de energía se puede expresar de forma cuantitativa de la manera siguiente:

$$E_P = E_c$$

$$\frac{1}{2}k\Delta x^2 = \frac{1}{2}mv^2$$

Sin embargo, debemos tener en cuenta que gran parte de la energía original se puede transformar en otras formas de energía, no solo en energía cinética del objeto proyectado. Consideremos el ejemplo siguiente:

Ejemplo resuelto

24 **a** Supongamos que la constante de fuerza de una catapulta es 480 N m^{-1}. Calcula la máxima velocidad posible que alcanzará una piedra de 50 g lanzada desde una catapulta si la elongación de la goma de la catapulta es 18 cm.

b Explica por qué en la práctica la velocidad será mucho menor.

a $\frac{1}{2}k\Delta x^2 = \frac{1}{2}mv^2$

$0{,}5 \times 480 \times 0{,}18^2 = 0{,}5 \times 0{,}05 \times v^2$

$v = 17{,}6\ m\ s^{-1}$

b Cuando aplicamos esta ecuación estamos suponiendo que la totalidad de la energía potencial elástica de la goma se transforma en energía cinética de la piedra, pero en la práctica mucha de la energía almacenada se transformará en energía cinética de la goma y en calentamiento de la goma.

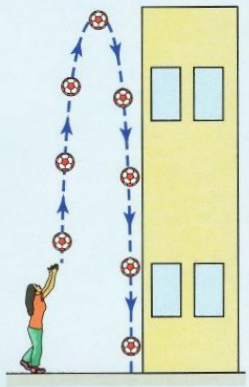
117 ¿Desde qué altura tendríamos que dejar caer una masa para que impactara contra el suelo con una velocidad de 5 m s^{-1} exactamente? (Supón que no hay resistencia del aire).

118 Se lanza una piedra verticalmente hacia arriba con una velocidad de 14 m s^{-1}. ¿Cuál es la altura máxima que alcanzará?

119 Para estimar la altura de un edificio se lanza repetidamente una pelota verticalmente hacia arriba a distintas velocidades hasta que alcanza justamente la parte superior del edificio (véase Figura 2.115).

a Estima la altura del edificio si pasan 4,2 s desde que se lanza la pelota hasta que golpea el suelo.

b ¿Cuáles son las principales fuentes de error en este experimento?



■ **Figura 2.115**

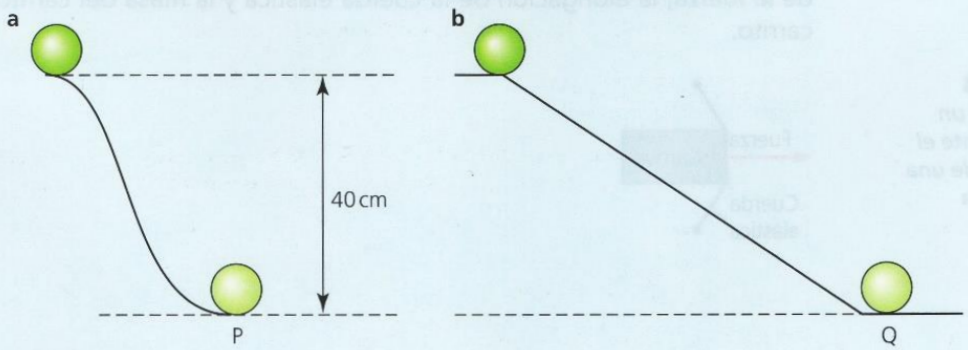
120 Se deja caer una pelota por una pendiente como la que se representa en la Figura 2.116a.

a Si suponemos que la superficie no presenta fricción, ¿cuál será la velocidad en el punto P? (Ignora los efectos de rodadura y de rotación de la pelota)

b Se deja caer la misma pelota por una pendiente (sin fricción) como la que se representa en la Figura 2.116b. ¿Cuál es la velocidad en el punto Q?

c Explica por qué la pelota alcanza más rápidamente el punto P que el punto Q.

d Pero las pelotas sí ruedan al bajar por las pendientes. Sugiere cómo afecta este hecho a tus respuestas.



■ **Figura 2.116**

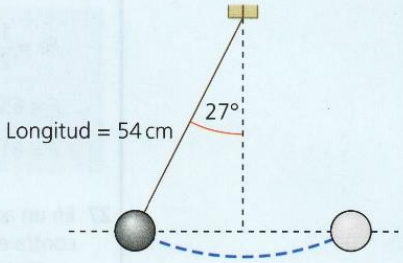
121 Se deja caer una pelota de goma verticalmente sobre el suelo desde una altura de 1,0 m. Después de colisionar contra el suelo, la pelota rebota hasta una altura de 60 cm. Al siguiente rebote ya solo alcanza una altura de 36 cm.

a ¿En qué forma se encuentra la energía cuando la pelota está en contacto con el suelo?

b Enumera las transferencias de energía que tienen lugar desde que se deja caer la pelota hasta el máximo del primer rebote.

c Calcula la velocidad de la pelota justo antes y justo después de que toque el suelo durante el primer rebote.

d Predice cuál será la altura del tercer rebote. ¿Qué supuestos has tenido en cuenta?



■ **Figura 2.117**

122 Calcula la máxima velocidad que alcanza el péndulo de la Figura 2.117 cuando se suelta desde la posición indicada.

123 Una bola de acero de masa 124 g que se desplaza a 8,24 m s^{-1} por una superficie horizontal sin fricción, colisiona con un muelle de compresión (con extremos abiertos) que tiene una constante de fuerza de 624 N m^{-1}. ¿Cuál es la máxima compresión posible del muelle?

124 Estiramos una cinta de goma de masa 4,7 g hasta obtener una elongación de 12 cm y después la soltamos, con lo que se proyecta verticalmente. La fuerza y la elongación son proporcionales y la constante de fuerza de la cinta es 220 N m^{-1}. Se supone que solo el 10% de la energía potencial elástica se transforma en energía cinética. Calcula la altura que alcanzará la cinta.

125 Un gimnasta de masa 39 kg salta desde una altura de 2,3 m sobre la superficie horizontal de un trampolín. Estima la constante de fuerza combinada de los muelles del trampolín si este se comprime 43 cm antes de pararse momentáneamente.

3 Realizar un trabajo para cambiar el movimiento

El uso de fuerzas para acelerar o decelerar objetos es una actividad humana habitual. La relación entre el trabajo realizado y el cambio de energía cinética tiene muchas aplicaciones. La ecuación es:

$$Fe = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mu^2$$

Para utilizar esta ecuación debemos asumir que la fuerza, F, es constante o bien podemos utilizar una fuerza media. Cuando la fuerza no varía linealmente se puede emplear el área bajo la curva fuerza–distancia para determinar el cambio en la energía cinética.

Esta ecuación se puede utilizar para objetos que se están acelerando o decelerando, pero cuando el movimiento empieza o acaba con un objeto en reposo (energía cinética cero) podemos escribir:

$$Fe = \frac{1}{2}mv^2$$

Esta ecuación nos indica que cuando se utiliza una fuerza para parar un objeto en movimiento, cuanto menor es la fuerza utilizada, mayor es la distancia que recorre el objeto hasta pararse. (O bien cuanto mayor es la fuerza utilizada, menor es la distancia que recorre el objeto hasta pararse). En consecuencia, para reducir las fuerzas en un impacto, la distancia (y el tiempo) que recorre el objeto hasta pararse debe ser lo mayor posible. Por ejemplo, saltar sobre arena comporta menos fuerza sobre nuestro cuerpo que saltar sobre un suelo sólido.

Si la velocidad de un objeto disminuye por el trabajo realizado por las fuerzas de fricción y/o la resistencia del aire, su energía cinética se transfiere en forma de energía interna, energía térmica o incluso algún tipo de sonido. Decimos entonces que la energía se ha **disipado**, es decir, se ha desprendido hacia el entorno. Este proceso sucede a nuestro alrededor constantemente.

Los objetos en movimiento también pueden ralentizarse porque colisionan con otros objetos. Como ocurre en el caso de la fricción, estas colisiones producen disipación de energía, pero normalmente parte de la energía se utiliza también para *deformar* los objetos. El cambio de forma puede ser temporal, pero a menudo es permanente.

Ejemplos resueltos

25 Una fuerza resultante constante de 2420 N actúa sobre un coche de 980 kg que está en reposo. ¿Cuál es la velocidad del coche cuando ha recorrido 100 m? (Ignora las fuerzas de resistencia.)

$$Fe = \frac{1}{2}mv^2$$

$$2420 \times 100 = \frac{1}{2} \times 980 \times v^2$$

$$v = 22 \text{ m s}^{-1}$$

(Si utilizamos $F = ma$ y las ecuaciones del movimiento obtenemos la misma respuesta.)

26 ¿Cuál es la fuerza media necesaria para parar un coche de masa 1350 kg y velocidad 28 m s^{-1} en una distancia de 65 m?

$Fe = \frac{1}{2}mv^2$

$F \times 65 = \frac{1}{2} \times 1350 \times 28^2$

$F = 8100\,N$

27 En un accidente de coche se debe impedir que el conductor se desplace hacia delante (respecto al coche) e impacte contra el volante en una distancia menor de 25 cm.

a Si el conductor tiene una masa de 80 kg, ¿qué fuerza se necesita para pararle dentro de esta distancia si el coche y él viajan a 10 m s^{-1} inmediatamente antes del impacto?

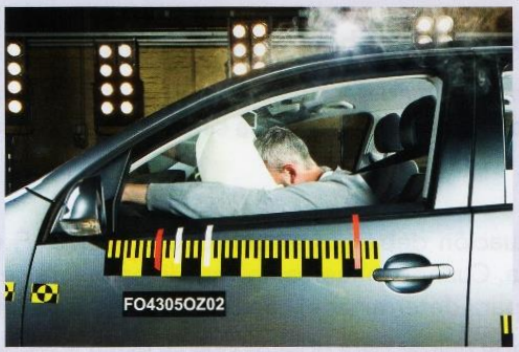
b ¿De dónde proviene la fuerza que se le aplica al conductor?

a $Fe = \frac{1}{2}mv^2$

$F \times 0{,}25 = \frac{1}{2} \times 80 \times 10^2$

$F = 16000\,N$

b La fuerza aplicada sobre el conductor proviene de una bolsa de aire que se hincha (airbag) y/o un cinturón de seguridad (Figura 2.118). Es una fuerza muy grande, pero considerablemente menor que la que actuaría sobre el conductor si colisionara con el volante. El efecto de la fuerza también se reduce porque se reparte en un área muy grande. (Esto último reduce la presión sobre el conductor.)



■ **Figura 2.118** *Un airbag reduce enormemente el impacto contra el volante en un accidente de coche*

126 ¿Qué fuerza media se necesita para reducir la velocidad de un tren de 400000 kg desde 40 m s^{-1} hasta 10 m s^{-1} en una distancia de 1,0 km?

127 La «zona de deformación absorbente» es un elemento de diseño que incorporan la mayoría de vehículos (Figura 2.119). Esta zona está diseñada para comprimirse y deformarse de forma permanente si se produce una colisión. Utiliza la ecuación $Fe = \frac{1}{2}mv^2$ para explicar por qué un vehículo no debe ser tan duro y rígido.



■ **Figura 2.119**
El frontal del coche se deforma pero el compartimento del pasajero permanece intacto

128 Un saltador de *puenting* (Figura 2.120) de masa 61 kg se mueve a 23 m s^{-1} cuando la cuerda elástica comienza a estirarse.

a Calcula la energía cinética que lleva la cuerda en ese momento.

En la Figura 2.121 se representa la variación de la elongación de la cuerda respecto a la fuerza aplicada.

b ¿Qué cantidad representa el área bajo la curva?

c Describe la relación fuerza–elongación representada en la gráfica.

d Utiliza la gráfica para estimar cuál es la elongación de la cuerda elástica cuando el saltador se detiene finalmente en su caída.

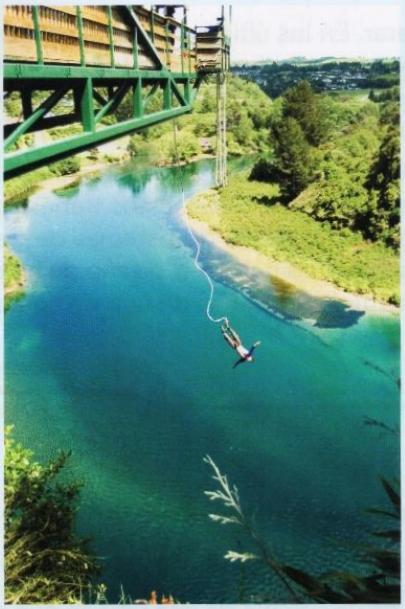


Figura 2.120
Puenting *en Taupo, Nueva Zelanda*

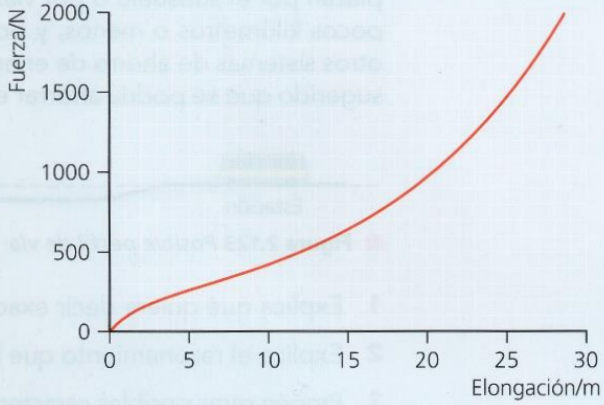


Figura 2.121 *Curva fuerza–elongación para una cuerda elástica de* puenting

129 Un saltador de pértiga de masa 59,7 kg cae desde una altura de 4,76 m sobre una colchoneta de espuma.
- **a** Calcula la energía cinética máxima del impacto.
- **b** ¿Tendrá la resistencia del aire un efecto significativo en la reducción de la velocidad del impacto? Razona tu respuesta.
- **c** Si la colchoneta de espuma se deforma 81 cm, calcula la fuerza media ejercida por el saltador de pértiga.

130 Explica por qué siempre se deben doblar las rodillas cuando se salta sobre el suelo.

131 **a** Golpeamos una vez un clavo sobre un bloque de madera con un martillo de 1,24 kg que se mueve a 12,7 $m\,s^{-1}$. Si el clavo se introduce 15 mm en el bloque, ¿cuál es la fuerza media ejercida sobre el clavo?
- **b** ¿Qué supuestos has tenido en cuenta?

Aplicaciones

Sistema de frenado regenerativo para trenes

La energía cinética que se debe proporcionar a un tren largo que se mueve a alta velocidad es considerable. Se pueden llegar a necesitar 10^8 J o más. Cuando el tren se detiene toda esta energía cinética se debe transferir a otras formas de energía y, a menos que se pueda recuperar, hay que transferir de nuevo la misma cantidad de energía para volver a acelerar el tren. Se trata de un proceso antieconómico en el que se despilfarra energía, por tanto se debe diseñar tanto el tren como su funcionamiento de manera que el despilfarro sea mínimo. Un posible método es minimizar el número de estaciones en las que paran los trenes grandes y rápidos, reduciéndolas al origen y al destino.

La mayoría de los sistemas de parada de vehículos en movimiento incluyen sistemas de frenado mediante los que la energía cinética del vehículo se transforma en energía interna a causa de la fricción. La energía interna se disipa al entorno en forma de



Figura 2.122
Los trenes ligeros de la red de transporte de Singapur (SBS) utilizan sistema de frenado regenerativo

energía térmica y no se puede recuperar. En los últimos años se han realizado numerosos estudios para diseñar «sistemas de frenado regenerativo» eficientes que normalmente comportan la generación de una corriente eléctrica que se puede utilizar para transferir energía en forma de transformaciones químicas que tienen lugar en baterías.

En las grandes ciudades de todo el mundo se utilizan pequeños trenes eléctricos que se desplazan por el subsuelo o por vías elevadas (Figura 2.122). Estos trenes suelen tener paradas cada pocos kilómetros o menos, y por tanto, la utilización de sistemas de frenado regenerativo o de otros sistemas de ahorro de energía es fundamental. En el diseño de nuevos trenes urbanos se ha sugerido que se podría ahorrar energía mediante el uso de una vía como la de la Figura 2.123.

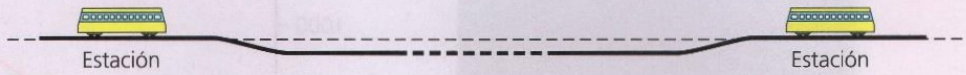


Figura 2.123 *Posible perfil de vía*

1 Explica qué quiere decir exactamente «ahorrar energía».

2 Explica el razonamiento que hay detrás de la propuesta que se representa en la Figura 2.123.

3 Propón otras posibles características de un sistema de tren urbano que podrían «ahorrar energía».

4 Analiza cuál sería el mejor tipo de motor/locomotora para este tipo de trenes.

Enlace con la teoría del conocimiento

Conceptos fundamentales

¿Hasta qué punto el conocimiento científico se basa en conceptos fundamentales como el de la energía? ¿Qué le sucede al conocimiento científico cuando nuestra comprensión de estos conceptos fundamentales cambia o evoluciona?

Cualquier definición en el ámbito de la física hace referencia casi con total seguridad a la energía, la masa y la fuerza. Estos conceptos se consideran esenciales para la comprensión del comportamiento del universo. También se pueden describir como fundamentales porque los científicos creen en la actualidad que estos conceptos no tienen una explicación simple, de modo que la comprensión de la física comienza con ellos. Pero nuestra comprensión de estos conceptos fundamentales ha cambiado a lo largo de los siglos y puede continuar evolucionando en el futuro.

La potencia como tasa de transferencia de energía

Cuando una persona, un animal o una máquina transfieren energía para realizar un trabajo útil, normalmente nos preocupa cuánto tiempo durará la transferencia. Si dos personas (o máquinas) efectúan la misma cantidad de trabajo útil decimos que la persona (o máquina) que lo hace más rápido es más potente. (En el uso diario, la palabra «potencia» se utiliza con un significado más vago, normalmente asociado a la fuerza y sin conexión con el tiempo). Si dos personas (o máquinas) efectúan la misma cantidad de trabajo útil decimos que la persona (o máquina) que lo hace utilizando la menor cantidad de energía es más eficiente.

La **potencia** es la tasa de transferencia de energía. Se define:

$$\text{potencia} = \frac{\text{energía transferida}}{\text{tiempo que dura la transferencia}}$$

El símbolo para la potencia es P y su unidad en el SI es el vatio, W ($1\ \text{W} = 1\ \text{J s}^{-1}$). Las unidades mW, kW, MW y GW son también de uso frecuente. A continuación se dan algunos ejemplos de valores de la potencia en la vida diaria.

- Cuando una mujer sube por unas escaleras transfiere energía química a energía gravitatoria a una tasa de unos 300 W.
- Una bombilla de 18 W transfiere energía eléctrica a energía luminosa y térmica a una tasa de 18 julios cada segundo.
- Una calculadora de 0,0001 W transfiere energía a una tasa de 0,0001 julios cada segundo.

- Un calentador de agua de 2 kW transfiere energía eléctrica a energía interna a una tasa de 2000 julios cada segundo.
- Un coche familiar medio puede tener una potencia de salida máxima de 100 kW.
- Una central térmica de fuel transfiere energía química a energía eléctrica a una tasa de 500 000 000 de julios cada segundo.
- En los hogares de muchas ciudades se utiliza energía eléctrica a una tasa media de alrededor de 1 kW.

En este capítulo nos interesa la transferencia de energía que da lugar a un trabajo realizado, W, de modo que podemos escribir:

$$\text{potencia} = \frac{\text{trabajo realizado}}{\text{tiempo que se tarda en realizarlo}}$$

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

Esta ecuación *no* figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Ejemplos resueltos

28 Calcula la potencia media de un escalador de 75 kg que escala una altura de 30 m en 2 minutos.

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

$$P = \frac{mg\Delta h}{\Delta t}$$

$$P = \frac{75 \times 9{,}81 \times 30}{2 \times 60}$$

$$P = 180\,\text{W}$$

29 ¿Qué potencia media se necesita para acelerar un coche de 1 200 kg desde el estado de reposo hasta 20 m s^{-1} en 8,0 s?

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

P = energía cinética ganada/tiempo que se tarda en ganarla

$$P = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{\Delta t}$$

$$P = \frac{0{,}5 \times 1200 \times 20^2}{8{,}0}$$

$$P = 3 \times 10^4\,\text{W}\ (= 30\,\text{kW})$$

Potencia transferida cuando se viaja a velocidad constante

En los cálculos del Ejemplo resuelto 29 no se tiene en cuenta la gran cantidad de trabajo realizado para vencer la resistencia del aire. Sin embargo, cuando un vehículo viaja a velocidad constante, todo el trabajo realizado se invierte en vencer la resistencia y no en producir aceleración. Si sustituimos por Fe en la ecuación de la potencia (donde F es la fuerza resistiva que, a velocidad constante, es igual y de sentido opuesto a la fuerza hacia delante), obtenemos:

$$P = \frac{F\Delta e}{\Delta t}$$

y como $\frac{\Delta e}{\Delta t} = v$, en consecuencia:

la potencia para mantener la velocidad constante = fuerza resistiva x velocidad

$$P = Fv$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Ejemplo resuelto

30 Un motor fueraborda con una potencia de salida máxima de 40 kW acciona un pequeño bote. La velocidad máxima que alcanza el bote es 27 nudos (1 nudo = 1,85 km h^{-1}). ¿Cuál es el módulo de la fuerza hacia adelante que proporciona el motor a esta velocidad?

$$1{,}85\,\text{km}\,\text{h}^{-1} = \frac{1{,}85 \times 1000}{3600} = 0{,}51\,\text{m}\,\text{s}^{-1}$$

A la velocidad máxima, la fuerza resistiva F = fuerza máxima del motor.

$P = Fv$

$40\,000 = F \times (27 \times 0{,}51)$

$F = 2900\,\text{N}$

Eficiencia

En física siempre nos topamos con el hecho de que, hagamos lo que hagamos, parte de la energía transferida «se pierde» porque se transfiere a formas menos «útiles». En mecánica este fenómeno normalmente se produce porque la fricción o la resistencia del aire transfieren energía cinética a energía interna y energía térmica. La energía útil que obtenemos a partir de cualquier transferencia de energía es *siempre* menor que la energía *total* transferida.

Cuando utilizamos un calentador de agua eléctrico, casi toda la energía transferida se emplea en calentar el agua y, por tanto, se puede describir como «útil», pero cuando utilizamos un cargador de teléfono móvil, por ejemplo, únicamente una parte de la energía se transfiere a la batería (la mayor parte de la energía restante se transfiere a energía térmica). Conducir un coche implica una transferencia de energía química desde el combustible, y la energía útil en este caso es la energía cinética del vehículo, aunque al final del trayecto no queda ya energía cinética.

Un proceso que proporciona una mayor salida de energía útil (para una entrada de energía dada) que otro proceso, se dice que es un proceso *más eficiente* que el segundo. La **eficiencia** se define de la manera siguiente:

$$\text{eficiencia} = \frac{\text{energía útil de salida}}{\text{energía total de entrada}} = \frac{\text{trabajo útil de salida}}{\text{trabajo total de entrada}}$$

La eficiencia no tiene unidades porque es el cociente entre dos energías. Se suele expresar en forma de porcentaje. Como consecuencia del principio de conservación de la energía, la eficiencia siempre debe ser menor que 1 (o 100%).

Si dividimos el trabajo por el tiempo podemos obtener una definición alternativa de la eficiencia en la que figura la potencia:

$$\text{eficiencia} = \frac{\text{potencia útil de salida}}{\text{potencia total de entrada}}$$

Estas dos ecuaciones figuran en el *Apéndice de datos de Física*.

Se puede estudiar la eficiencia de *cualquier* transferencia de energía, como por ejemplo la eficiencia con la que nuestro cuerpo transfiere la energía química de los alimentos a otras formas de energía. No obstante, cuando hablamos de eficiencia solemos referirnos a aparatos eléctricos y motores de diversos tipos, especialmente aquellos para los que se puede calcular fácilmente la energía o la potencia de entrada. En ocasiones debemos dejar muy claro de qué estamos hablando. Por ejemplo, cuando estudiamos la eficiencia de un coche, ¿nos referimos solo al motor, o al coche en su conjunto desplazándose por una vía con toda la energía de disipación debida a las fuerzas resistivas?

Las eficiencias de las máquinas y de los motores normalmente cambian con las condiciones de funcionamiento. Por ejemplo, existe una cierta carga con la que un motor eléctrico funciona con su máxima eficiencia; si se utiliza para levantar una masa muy pequeña o muy grande probablemente será ineficiente. De forma análoga, los coches están diseñados para tener su eficiencia máxima a una determinada velocidad, normalmente alrededor de los 100 km h^{-1}. Si el coche viaja a mayor (o menor) velocidad su eficiencia disminuye, lo que se traduce en que consume más combustible por cada quilómetro recorrido.

Los motores de los coches, como todos los demás motores que se basan en la quema de un combustible para transferir energía, son ineficientes a causa de principios físicos fundamentales (Opción B). No podemos hacer nada para cambiar este hecho, aunque las mejoras en el diseño y en el mantenimiento pueden suponer a su vez una mejora en la eficiencia.

Desde hace unos años existe una mayor conciencia mundial de la necesidad de conservar los recursos energéticos del planeta y limitar los efectos sobre el calentamiento global del uso de los combustibles de origen fósil en las centrales eléctricas y en diversos métodos de transporte (véase Capítulo 8). La mejora de la eficiencia de estos «motores térmicos» desempeña un importante papel en este tema de interés mundial.

Se pueden diseñar muchos tipos de experimentos para determinar la eficiencia de distintas máquinas y procesos. En la Figura 2.124 se muestra cómo se puede determinar la eficiencia de un motor eléctrico comparando la potencia eléctrica de entrada con la tasa a la que el motor puede levantar una *carga* (peso) conocido. Se puede estudiar la variación de la eficiencia con la carga y/o la potencia de entrada.

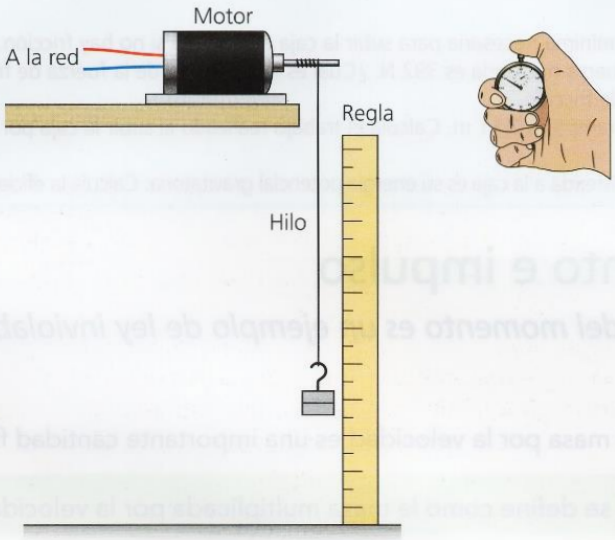


Figura 2.124 *Experimento para medir la eficiencia de un motor*

Ejemplo resuelto

31 a En un experimento se proporciona energía eléctrica a un motor a una tasa de 0,80 W (Figura 2.124). ¿Cuál es la eficiencia del motor si levanta una carga de 20 g a una altura de 80 cm en 1,3 s?

b ¿Qué le sucede a la energía que no es transferida de forma útil a la carga?

a Potencia utilizada para levantar la masa, $P = \frac{mg\Delta h}{\Delta t}$

$$P = \frac{0{,}02 \times 9{,}81 \times 0{,}80}{1{,}3}$$

$$P = 0{,}12\,\text{W}$$

$$\text{eficiencia} = \frac{\text{potencia útil de salida}}{\text{potencia total de entrada}}$$

$$\text{eficiencia} = \frac{0{,}12}{0{,}80} = 0{,}15 \text{ (o } 15\%\text{)}$$

b El 85% de la energía transferida por la red eléctrica al motor no se aplica con éxito a aumentar la energía gravitatoria de la carga. La energía «perdida» se transforma principalmente en energía interna del motor, que después se transforma en energía térmica que va a parar al entorno. Además, una parte de la energía se transforma en sonido y otra se utiliza en estirar el muelle que conecta la carga con el motor.

132 a ¿Cuánta energía se debe transferir a doce botellas de 1,7 kg para levantarlas desde el suelo hasta una estantería que está a 1,2 m de altura?

b Si para hacer esta operación se han tardado 18 s, ¿cuál ha sido la potencia media útil?

133 Estima la potencia de salida de un motor que puede elevar un ascensor de 800 kg de masa con seis pasajeros un total de 38 pisos en 52 s. (Supón que no hay contrapeso).

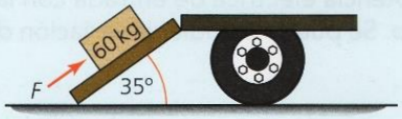
134 ¿Qué magnitud tienen las fuerzas resistivas que se oponen al movimiento de un coche que funciona con una potencia de salida de 23 kW a una velocidad constante de 17 m s^{-1}?

135 a ¿Cuál es la potencia de salida de un avión a reacción que tiene un empuje hacia delante de 660 000 N cuando viaja a su velocidad máxima de 950 km h^{-1} (264 m s^{-1}) a través del aire en calma?

b Si en un hogar se consume en promedio una potencia eléctrica de 1 kW, ¿a cuántos hogares se podría suministrar potencia con la cantidad calculada en el apartado anterior?
c Discute si el rápido aumento del uso del avión para viajar alrededor del mundo es recomendable o no.

136 La potencia de salida de una central eléctrica es 325 MW. ¿Cuál es la potencia de entrada si la eficiencia es del 36%?

137 Una persona utiliza una rampa para empujar una caja de 60,0 kg hacia la parte trasera de un camión, tal como se muestra en la Figura 2.125. Para levantar la caja directamente se necesitaría una fuerza vertical de 590 N, pero si se utiliza la rampa la fuerza necesaria se reduce.



■ **Figura 2.125**

a Calcula la fuerza mínima necesaria para subir la caja a la rampa si no hay fricción.
b En la práctica la fuerza necesaria es 392 N. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza de fricción? Explica por qué puede ser útil la fuerza de fricción.
c La longitud de la rampa es 2,11 m. Calcula el trabajo realizado al subir la caja por la rampa desde el suelo hasta el camión.
d La energía útil transferida a la caja es su energía potencial gravitatoria. Calcula la eficiencia cuando se utiliza la rampa.

2.4 Momento e impulso

La conservación del momento es un ejemplo de ley inviolable

■ Momento

El producto de la masa por la velocidad es una importante cantidad física.

El **momento lineal** se define como la masa multiplicada por la velocidad.

El momento se representa mediante el símbolo p y sus unidades son los quilogramos por metro y por segundo, kg m s^{-1}.

$$p = mv$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Como la ecuación de la energía cinética es $E_c = \frac{1}{2}mv^2$, la conexión entre el momento y la energía cinética se puede expresar como:

$$E_c = \frac{p^2}{2m}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Cuando se efectúan cálculos en los que aparece el momento lineal, es importante recordar que se trata de una magnitud vectorial y que, por tanto, siempre se debe dar su dirección y su sentido. En el núcleo de este curso solo trabajaremos con el momento asociado al movimiento en línea recta (momento *lineal*), pero podemos aplicar las mismas ideas al momento *angular* asociado a los objetos o las partículas en rotación (Opción B).

Ejemplo resuelto

32 Una pelota de masa 540 g que se mueve verticalmente hacia abajo impacta contra el suelo a una velocidad de 8,0 m s^{-1}. Después del impacto rebota hacia arriba con una velocidad inicial de 5,0 m s^{-1}.
a Calcula el momento de la pelota inmediatamente antes del impacto e inmediatamente después de este.
b ¿Cuál es el cambio en el momento durante el impacto (Δp)?

a El momento inicial antes del impacto, $p = mu = 0{,}54 \times 8{,}0 = 4{,}3$ kg m s^{-1} hacia abajo. El momento final tras el impacto, $p = mv = 0{,}54 \times 5{,}0 = 2{,}7$ kg m s^{-1} hacia arriba.

Los sentidos opuestos se pueden representar mediante signos positivos y negativos en lugar de descripciones. Así, el momento antes del impacto es +4,3 kg m s^{-1} y el momento tras el impacto es −2,7 kg m s^{-1}. (La elección de signos es intercambiable.)

b $\Delta p = (-2{,}7) - (+4{,}3) = -7{,}0$ kg m s^{-1} (hacia arriba)

Expresión de la segunda ley de Newton en términos de tasa de cambio del momento

Si volvemos a la segunda ley del movimiento de Newton ($F = ma$), podemos reescribirla en términos del momento mediante la definición de la aceleración, $a = (v - u)/t$:

$$F = \frac{m(v - u)}{t}$$

$$F = \frac{mv - mu}{t}$$

Esta ecuación se puede expresar con palabras de la manera siguiente: la fuerza es igual al cambio en el momento dividido por el tiempo, o la *fuerza es igual a la tasa de cambio del momento*. Esta versión de la segunda ley de Newton se escribe habitualmente en la forma:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

En la mayoría de situaciones ambas versiones de la segunda ley de Newton son equivalentes y elegiremos una u otra en función de la información disponible. Como la versión anterior no requiere conocer el dato de una masa constante, se trata de una formulación de la segunda ley más generalizada.

En la Figura 2.126 se muestra un golpe de kárate con el que se rompen varias tablas de madera. Consideremos $F = \Delta p/\Delta t$: para maximizar la fuerza que actúa entre la mano y las tablas, la masa que impacta contra las tablas debe ser lo mayor posible y debe moverse a gran velocidad. El tiempo de impacto debe ser el menor posible.



Figura 2.126
Golpe de kárate sobre tablas de madera

Impulso y gráficas fuerza–tiempo

Impulso

Tal como se ha explicado al principio de este capítulo, muchas fuerzas actúan sobre los objetos solo durante un tiempo limitado, y cuanto más tiempo actúa la fuerza mayor es el efecto que produce. Por este motivo se introduce el concepto de *impulso*:

El **impulso** se define como el producto de la fuerza por el tiempo durante el que actúa:

impulso = $F\Delta t$

Si reorganizamos la ecuación $F = \Delta p/\Delta t$ obtenemos:

$$F\Delta t = \Delta p$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*. Expresada con palabras dice:

impulso = cambio del momento

El impulso tiene las mismas unidades que el momento: $kg\,m\,s^{-1}$ (también se puede utilizar N s). En este libro no emplearemos ningún símbolo para representar el impulso.

Ejemplo resuelto

33 Calcula la fuerza media ejercida sobre la pelota que rebota contra el suelo del Ejemplo resuelto 32 si la duración del impacto es 0,18 s.

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

$$F = \frac{-7,0}{0,18} = -39\,\text{N}$$

(El signo negativo indica una fuerza hacia arriba).

Podríamos obtener la misma respuesta a partir de $F = ma$:

$$a = \frac{(v-u)}{t} = \frac{(-5,0)-(+8,0)}{0,18} = -72\,\text{m s}^{-2}$$

Entonces,

$$F = ma = 0,54 \times (-72) = -39\,\text{N}$$

Gráficas fuerza–tiempo

Cuando efectuamos cálculos simples relacionados con el impulso podemos suponer que las fuerzas implicadas son constantes, o bien que la fuerza media es la mitad de la fuerza máxima. Sin embargo, si queremos efectuar cálculos más exactos estas suposiciones no bastan, y necesitamos conocer con detalle la variación de la fuerza durante la interacción. Estos detalles se representan habitualmente mediante gráficas fuerza–tiempo. La curva de la Figura 2.127 representa un ejemplo típico de la variación de una fuerza a lo largo de un tiempo.

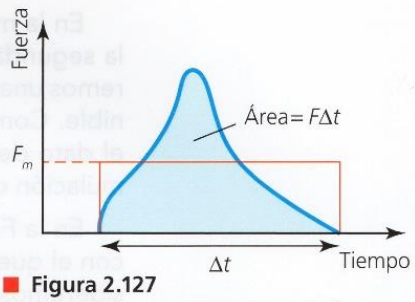


Figura 2.127
Gráfica en la que se representa la variación de la fuerza con el tiempo

En general, el área bajo la curva fuerza–tiempo de una interacción equivale a la fuerza x tiempo, que equivale a su vez al impulso (o cambio del momento). Esto es cierto con independencia de la forma de la curva. Se puede estimar el área bajo la curva de la Figura 2.127 dibujando un rectángulo de la misma área (a ojo), como el marcado en rojo. La fuerza media durante la interacción es, por tanto, el valor F_m.

Se pueden utilizar sensores de fuerzas para medir la magnitud de las fuerzas que actúan en intervalos cortos de tiempo, y registradores de datos que recojan los datos obtenidos con el fin de representar gráficas de fuerza–tiempo para numerosas interacciones, tanto dentro como fuera del laboratorio. También es muy interesante e instructivo visionar grabaciones con moviola de colisiones.

Las gráficas fuerza–tiempo pueden ser útiles para el análisis de cualquier tipo de interacción, pero lo son especialmente en el caso de impactos relacionados con accidentes de tráfico y deportes.

Ejemplo resuelto

34 En la Figura 2.128 se representa la variación de la fuerza que actúa sobre una pelota de tenis de masa 57 g que se mueve a 24 m s^{-1} cuando es golpeada por una raqueta que se mueve en sentido contrario.

a Estima el impulso proporcionado a la pelota.

b ¿Cuál es la velocidad de la pelota tras haber sido golpeada por la raqueta?

c Golpeamos la pelota con la misma fuerza pero con distintas raquetas. Explica por qué una raqueta con las cuerdas flojas devuelve la pelota con una velocidad mayor.

d ¿Cuál es la desventaja de jugar al tenis con una raqueta con las cuerdas flojas?

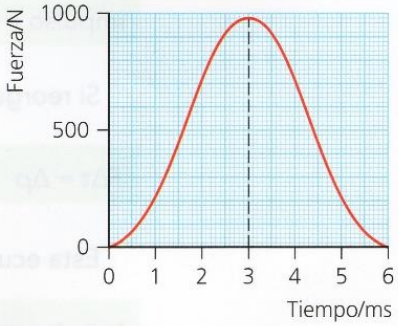


Figura 2.128
Gráfica fuerza–tiempo cuando se golpea una pelota de tenis

a Área aproximada bajo la curva = 1 000 × (3,0 × 10^{-3}) = 3,0 N s

b $m\Delta v = 3,0$

$$\Delta v = \frac{3,0}{0,057} = 53\,\text{m s}^{-1}$$

La velocidad inicial es $24\,m\,s^{-1}$ hacia la raqueta. Si el cambio de velocidad es de $53\,m\,s^{-1}$, la pelota debe haber salido despedida de la raqueta con una velocidad de $(53 - 24) = 29\,m\,s^{-1}$.

c El tiempo de contacto con la pelota, Δt, es mayor cuando las cuerdas de la raqueta están flojas, por tanto, la misma fuerza producirá un mayor impulso (cambio del momento).

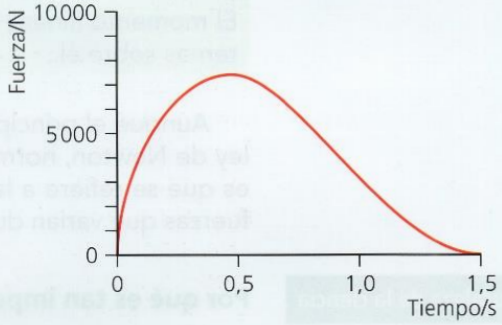
d Hay un menor control de la dirección de la pelota.

138 Un tren de masa $2,3 \times 10^6\,kg$ que viaja hacia el este por una vía recta a una velocidad de $14,3\,m\,s^{-1}$ reduce su velocidad hasta $9,8\,m\,s^{-1}$. ¿Cuál es el cambio en el momento?

139 ¿Qué fuerza media se necesita para reducir la velocidad de un coche de 1200 kg desde $24\,m\,s^{-1}$ a $11\,m\,s^{-1}$ en 4,8 s?

140 Un bate de béisbol golpea una pelota con una fuerza media de 970 N que actúa durante 0,0088 s.
- **a** ¿Qué impulso se le ha proporcionado a la pelota?
- **b** ¿Cuál es el cambio del momento de la pelota?
- **c** La pelota vuelve a ser golpeada en la misma dirección que venía. Si su velocidad antes del impacto es $32\,m\,s^{-1}$, ¿cuál es su velocidad después de este? (La masa de la pelota de béisbol es de 145 g).

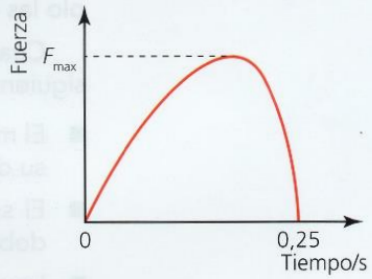
141 En la Figura 2.129 se representa la variación con el tiempo de la fuerza entre dos coches que colisionan. Ambos coches viajan en la misma dirección y después de colisionar no quedan pegados.
- **a** Estima el impulso.
- **b** Justo antes de la colisión el coche que va más rápido (masa 1200 kg) viaja a $18\,m\,s^{-1}$. Estima su velocidad inmediatamente después de la colisión.



■ **Figura 2.129**

142 Una pelota blanda (A) de masa 500 g se mueve hacia la derecha con una velocidad de $3,0\,m\,s^{-1}$ cuando colisiona con otra pelota blanda (B) que se mueve hacia la izquierda. La duración del impacto es 0,34 s y tras este la pelota A rebota con una velocidad de $2,0\,m\,s^{-1}$.
- **a** ¿Cuál es el cambio de velocidad de la pelota A?
- **b** ¿Cuál es el cambio del momento de la pelota A?
- **c** Calcula la fuerza media ejercida sobre la pelota A.
- **d** Esboza una gráfica fuerza–tiempo para el impacto.
- **e** Añade a la gráfica anterior una posible curva fuerza–tiempo para la colisión de pelotas duras de masas y velocidades similares.
- **f** Sugiere motivos por los que la curva fuerza–tiempo para la pelota B podría ser distinta (o igual) que la curva fuerza–tiempo para la pelota A.

143 Un conductor que ha sufrido un accidente ha evitado impactar contra el volante gracias a la acción de un airbag. En la Figura 2.130 se representa la variación de la fuerza sobre el conductor durante el accidente (hasta que el coche se queda en reposo).
- **a** Si sobre el conductor ha actuado una fuerza máxima de 2800 N, estima la fuerza media que ha actuado durante los 0,25 s.
- **b** ¿Cuál ha sido el cambio del momento del conductor?
- **c** Si la masa del conductor es 73 kg, ¿cuál era la velocidad en $km\,h^{-1}$ del coche y el conductor antes del accidente?



■ **Figura 2.130**

144 Considera la Figura 2.126.
- **a** Analiza con detalle cómo puede el movimiento del karateka maximizar la fuerza ejercida sobre las tablas de madera.
- **b** Sugiere qué características de las tablas pueden contribuir a llevar a cabo esta impresionante demostración.

145 **a** ¿Cuál es el momento de un coche de 1340 kg que tiene una energía cinética de $4,30 \times 10^5$ J?
- **b** ¿Cuál es la energía cinética de una masa de 340 g que tiene un momento de $8,3\,kg\,m\,s^{-1}$?
- **c** ¿Cuál es la masa de una partícula subatómica que tiene un momento de $2,50 \times 10^{-23}\,kg\,m\,s^{-1}$ cuando su energía cinética es $3,43 \times 10^{-16}$ J?

Conservación del momento lineal

A partir de la tercera ley de Newton sabemos que cuando dos objetos *cualesquiera* interactúan (más comúnmente *colisionan*) durante un tiempo deben ejercerse mutuamente una fuerza, F, igual y de sentido opuesto. Consideremos de nuevo la Figura 2.89.

$$F_A = -F_B$$

Como consecuencia, los impulsos, F, y los cambios del momento, también deben ser iguales y de sentidos opuestos:

$$F_A \Delta t = -F_B \Delta t$$
$$\Delta p_A = -\Delta p_B$$

En otras palabras, si los objetos A y B se ejercen fuerzas mutuamente, cualquier ganancia de momento de A *debe* ser igual a la pérdida de momento de B de manera que el momento total permanezca constante. Hay que remarcar que esto es cierto *solo si no están actuando otras fuerzas externas*. La *ley de conservación del momento* expresa todo lo anterior:

El momento (lineal) total de cualquier sistema es constante siempre que no actúen fuerzas externas sobre él.

Aunque el principio de conservación del momento contiene en esencia la misma física que la ley de Newton, normalmente tiene una mayor aplicación en las situaciones cotidianas. El motivo es que se refiere a las masas y a las velocidades antes y después de una interacción, y no a las fuerzas que varían durante intervalos cortos de tiempo.

Naturaleza de la ciencia

Por qué es tan importante el concepto de momento

No se conocen excepciones al principio de conservación del momento (tercera ley de Newton), y esta es la razón por la que el momento es una magnitud física tan importante. Como le ocurre a la energía, el momento *siempre* se conserva. En consecuencia, estos principios fundamentales son piezas extremadamente útiles de la física que pueden contribuir a predecir lo que ocurrirá en cualquier interacción en la que intervengan fuerzas entre cualquier número de objetos, desde los más grandes (astronómicos) a los más pequeños (microscópicos), como por ejemplo las colisiones entre partículas atómicas.

Cuando utilizamos el principio de conservación del momento debemos recordar los puntos siguientes:

- El momento es una magnitud vectorial, de modo que en los cálculos siempre se debe incluir su dirección y sentido.
- El sistema debe estar aislado: solo se deben considerar los objetos que interactúan y no debe haber fuerzas que actúen desde el exterior.
- Inmediatamente después de una interacción, habitualmente las fuerzas externas (como la fricción) afectan al movimiento de los objetos.

Es fácil poner ejemplos en los que el momento de un objeto disminuye hasta cero, lo que parece contradecir el principio de conservación del momento. Esta pérdida aparente de momento normalmente se debe a que el sistema no está aislado (sobre él actúan fuerzas externas, como la fricción). En otros ejemplos, parece que se pierde parte del momento o la totalidad de este cuando algo colisiona con un objeto que tiene una masa mucho mayor. Puede suceder que el movimiento tras el impacto sea demasiado pequeño para que pueda ser observado o medido. Un ejemplo característico es el de una persona que salta sobre el suelo. El movimiento que se puede predecir del sistema persona–Tierra tras el impacto es insignificante.

La fuerza de la gravedad normalmente produce un incremento del momento de los objetos que caen, pero los objetos no son sistemas aislados, ya que hay fuerzas externas actuando sobre ellos. Por ejemplo, una piedra de 3 kg experimenta una fuerza gravitatoria hacia la Tierra de unos 30 N aproximadamente y, por tanto, gana momento a medida que se acelera hacia abajo. La ley de conservación del momento predice correctamente que la Tierra debe ganar un momento equivalente hacia arriba en dirección a la roca. Sin embargo, como la masa de la Tierra es tan grande, su ganancia de momento es insignificante.

En la Figura 2.131 podemos ver pistolas de agua. Antes del disparo, la pistola y el agua que hay en su interior no tienen momento, pero tras el disparo el agua gana momento (hacia delante). El principio de conservación del momento nos dice que la pistola debe ganar un momento igual al del agua pero en sentido contrario.



Figura 2.131
Las pistolas de agua son muy populares en el festival de Songkran (Tailandia)

Ejemplo resueltos

35 Una masa A (4,0 kg) se desplaza a 3,0 m s–1 hacia la derecha cuando colisiona con una masa B (6,0 kg) que se desplaza en sentido opuesto a 5,0 m s^{-1}.

a Si ambas masas se quedan pegadas tras la colisión, ¿cuál es su velocidad?

b ¿Qué supuestos has tenido en cuenta para responder a la pregunta anterior?

a El momento total debe ser el mismo antes y después de la colisión. Si escogemos el signo positivo para las velocidades y los momentos que van hacia la derecha, y el signo negativo para las (y los) que van hacia la izquierda:

momento de A = $m_A u_A = 4{,}0 \times (+3{,}0) = +12{,}0\,\text{kg m s}^{-1}$

momento de B = $m_B u_B = 6{,}0 \times (-5{,}0) = -30\,\text{kg m s}^{-1}$

Por tanto, el momento total (antes de la colisión) es $+12 + (-30) = -18\,\text{kg m s}^{-1}$. El momento total después de la colisión debe ser el mismo que el momento antes de esta, en consecuencia:

$m_{AB} v_{AB} = -18\,\text{kg m s}^{-1}$

$(4 + 6) v_{AB} = -18\,\text{kg m s}^{-1}$

$$v_{AB} = \frac{-18}{10} = -1{,}8\,\text{m s}^{-1}$$

El signo negativo indica que la velocidad va hacia la izquierda.

El método que se ha seguido hasta aquí se ha explicado detalladamente para facilitar la comprensión. Sin embargo, para responder cualquier pregunta relacionada con la interacción de dos masas se puede proceder de una manera más directa:

momento antes de la interacción = momento después de la interacción

$m_A u_A + m_B u_B = m_A v_A + m_B v_B$

En este ejemplo:

$(4{,}0 \times 3{,}0) + (6{,}0 \times -5{,}0) = (4{,}0 + 6{,}0) \times v_{AB}$

$v_{AB} = -1{,}8\,\text{m s}^{-1}$

b La suposición que se ha tenido en cuenta es la no existencia de fuerzas externas actuando sobre el sistema. Si las fuerzas de fricción son significativas, la respuesta que hemos calculado se puede considerar que corresponde a la velocidad instantánea inmediatamente después de la colisión, y los efectos de la fricción se pueden tener en cuenta más tarde.

36 Un autobús de masa 5 800 kg que viaja a una velocidad constante de 24 m s^{-1} impacta con la parte trasera de un coche de masa 1 200 kg que viaja a 18 m s^{-1} en la misma dirección y sentido. Calcula la velocidad del autobús inmediatamente después de la colisión si el coche es empujado hacia delante con una velocidad de 20 m s^{-1}. (Supón que se trata de un sistema aislado e ignora las acciones de los conductores y de los motores.)

momento antes de la interacción = momento después de la interacción

$m_A u_A + m_B u_B = m_A v_A + m_B v_B$

$(5\,800 \times 24) + (1\,200 \times 18) = (5\,800 \times v_{bus}) + (1\,200 \times 20)$

$v_{bus} = 23{,}6\,\text{m s}^{-1}$ en la dirección y sentido originales

37 Se dispara una bala de masa 12,0 g a una velocidad de 550 m s^{-1} con un rifle de masa 1,40 kg (Figura 2.132). ¿Qué le sucede al rifle?

En este ejemplo el momento total es cero. Esto significa que el momento de la bala debe ser igual al del rifle y en sentido opuesto.

momento antes de la interacción = momento después de la interacción

$$m_A u_A + m_B u_B = m_A v_A + m_B v_B$$

$$0 + 0 = (0{,}012 \times 550) + (1{,}40 \times v_{rifle})$$

$$v_{rifle} = \frac{-6{,}60}{1{,}40} = -4{,}71 \text{ m s}^{-1}$$

El signo negativo indica que el rifle se mueve en sentido contrario a la bala. (A este fenómeno se le suele denominar *retroceso*).



Figura 2.132

Perspectivas adicionales

El principio de conservación del momento y los accidentes de tráfico

El principio de conservación del momento es útil cuando se quieren determinar las velocidades de vehículos involucrados en un accidente de tráfico.



Figura 2.133
En esta prueba de colisión se conserva el momento

Cada año mueren en el mundo más de 1,2 millones de personas a causa de accidentes de tráfico y cerca de 25 millones sufren lesiones graves por esta misma causa. En promedio, las posibilidades que tiene una persona de morir en un accidente de tráfico ascienden a 1 sobre 80. No obstante, existen grandes diferencias en los niveles de seguridad vial entre los distintos países, principalmente a causa de las diferencias en el comportamiento de los conductores y de otros usuarios de la vía, además de los propios niveles de control policial y el estado de conservación de las vías.

En la mayoría de países el diseño de nuevos vehículos contempla muchos elementos destinados a proteger a sus ocupantes en caso de accidente. Entre los denominados **elementos de seguridad pasiva** se cuentan los cinturones de seguridad, los *airbags*, el almohadillado de las superficies interiores y las zonas de deformación absorbente. Todos estos elementos reducen las fuerzas del impacto mediante el incremento del tiempo y la distancia asociados. Sin embargo, a la mayoría de las personas que mueren a causa de accidentes de tráfico no les afectan estas medidas porque no se encuentran *dentro* de los vehículos: normalmente son, o bien peatones, o bien conductores o pasajeros de bicicletas o motos de diversos tipos, que reciben el impacto de vehículos que se mueven más rápido.

1 Busca en Internet qué lugar ocupa tu país en la lista anual de accidentes de tráfico/muertes. Si es posible, determina las principales causas de accidentes de tráfico en tu país y discute cómo se podría mejorar esta situación.

2 Existe un acuerdo común sobre el hecho de que los vehículos que viajan demasiado rápido (para las condiciones de la vía) son una causa principal de accidentes graves. Recuerda que cuando se duplica la velocidad de un coche su energía cinética aumenta en un factor cuatro. La reducción de los límites de velocidad es una recomendación evidente para intentar reducir el número de accidentes, pero muchas personas están en contra de esta idea. Sugiere por qué.

146 Un cuerpo de masa 2,3 kg que se desplaza hacia la izquierda a 82 cm s^{-1} colisiona con una masa en reposo de 1,9 kg. Si tras la colisión el cuerpo y la masa quedan pegados, ¿cuál es la velocidad después del impacto?

147 Se deja caer al suelo desde una altura de 1,46 m un saco de cemento de 50,9 kg que está en reposo.
- **a** ¿Cuál es la velocidad máxima del saco cuando impacta contra el suelo?
- **b** ¿Habrá mucha diferencia entre la velocidad real y la velocidad teórica máxima? Razona tu respuesta.
- **c** Suponiendo que el saco no rebote, predice cuál será la velocidad combinada de la Tierra y el saco después del impacto. (Masa de la Tierra = $6,0 \times 10^{24}$ kg). ¿Se puede medir esta velocidad?

148 Para determinar la velocidad de una bala de 2,4 g, se idea un experimento que consiste en dispararla contra un bloque de madera de 650 g en reposo sobre una superficie sin fricción. Si el conjunto bloque + bala sale desplazado con una velocidad inicial de 96 cm s^{-1}, ¿cuál era la velocidad de la bala?

149 Una bala que se mueve verticalmente hacia arriba decelera y su momento decrece, aunque la ley de conservación del momento afirma que el momento total no puede cambiar. Explica esta observación.

150 Una astronauta de masa 90 kg lanza un martillo de 2,3 kg a una velocidad de 80 cm s^{-1}. ¿Qué le sucede a la astronauta? ¿Cómo puede dejar de moverse?

151 Dos coches de juguete viajan en la misma dirección y sentidos contrarios por una vía sin fricción. El coche A tiene una masa de 432 g y una velocidad de 83,2 cm s^{-1}. El coche B tiene una masa de 287 g y una velocidad de 68,2 cm s^{-1}. Si se quedan pegados tras el impacto, ¿cuál es su velocidad combinada?

152 Una bala de acero de masa 1,2 kg que se mueve a 2,7 m s^{-1} colisiona frontalmente contra otra bala de acero de masa 0,54 kg que se mueve en sentido contrario a 3,9 m s^{-1}. Las balas rebotan una contra la otra y cada una vuelve en la misma dirección que vino.
- **a** Si la velocidad de la bala más pequeña tras la colisión es 6,0 m s^{-1}, utiliza la ley de conservación del momento para predecir la velocidad de la bala más grande.
- **b** En realidad, este resultado es imposible. Sugiere un motivo para ello.

153 En la Figura 2.134 se muestran dos carritos que se desplazan por una superficie sin fricción y que se mantienen unidos mediante una cuerda elástica bajo tensión. Cuando se libera esta tensión, los carritos se aceleran uno hacia el otro y la cuerda se afloja rápidamente. ¿Cuándo crees que colisionarán los carritos?

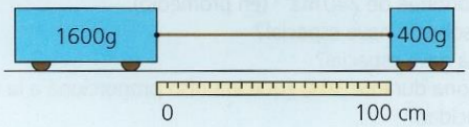


Figura 2.134

Propulsión de vehículos

Para acelerar un vehículo, o para mantener su movimiento a velocidad constante superando las fuerzas de fricción y la resistencia del aire, necesitamos aplicar una fuerza. Podemos pensar en empujar el vehículo hacia atrás, de modo que la vía empuje el vehículo hacia delante (tercera ley de Newton). Sin embargo, la mejor manera de explicar el movimiento de barcos o vehículos a través del aire o del espacio, es mediante el momento proporcionado a algo que se mueva en sentido contrario al sentido del movimiento que nos interesa para el vehículo en cuestión.

Cuando la hélice de la Figura 2.135 gira, una fuerza empuja el agua hacia atrás y, por tanto, otra fuerza igual y en sentido contrario empuja la lancha hacia adelante. Si no hubiera otras fuerzas actuando sobre la lancha, el momento (hacia atrás) del agua que se desplaza a gran velocidad sería igual y en sentido contrario al momento (hacia delante) de la lancha que se desplaza lentamente.

El uso de remos y palas en las barcas se basa en principios análogos, mientras que las hélices de aviones y helicópteros desplazan el aire a gran velocidad en sentido contrario al sentido del movimiento que nos interesa para el vehículo en cuestión.

Los motores a propulsión del avión de la Figura 2.136 queman combustible combinado con oxígeno del aire que entra por la parte delantera del motor. Los gases resultantes son eyectados (lanzados hacia fuera) a gran velocidad por la parte trasera del motor. La ganancia de momento (hacia atrás) de los gases debe ser igual y de sentido contrario a la ganancia de momento (hacia delante) del motor + el avión (si no actúan otras fuerzas).

La tercera ley de Newton ofrece una explicación alternativa equivalente: la fuerza que empuja los gases hacia atrás es igual y de sentido contrario a la fuerza que empuja el avión hacia delante. Para el caso de los cohetes se pueden aplicar ideas similares, salvo que no hay entrada de aire por la parte delantera.

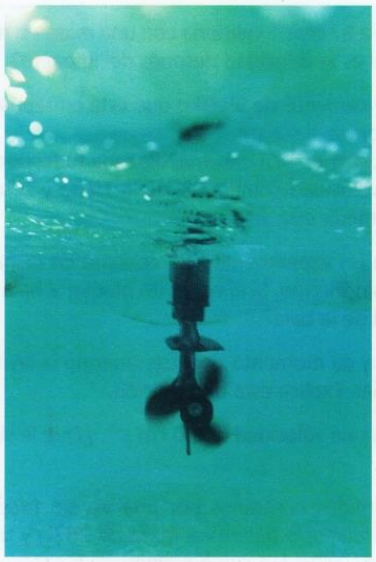


Figura 2.135
La hélice situada en la parte trasera de la lancha ejerce una fuerza sobre el agua y el agua ejerce a su vez una fuerza en sentido contrario que desplaza la lancha

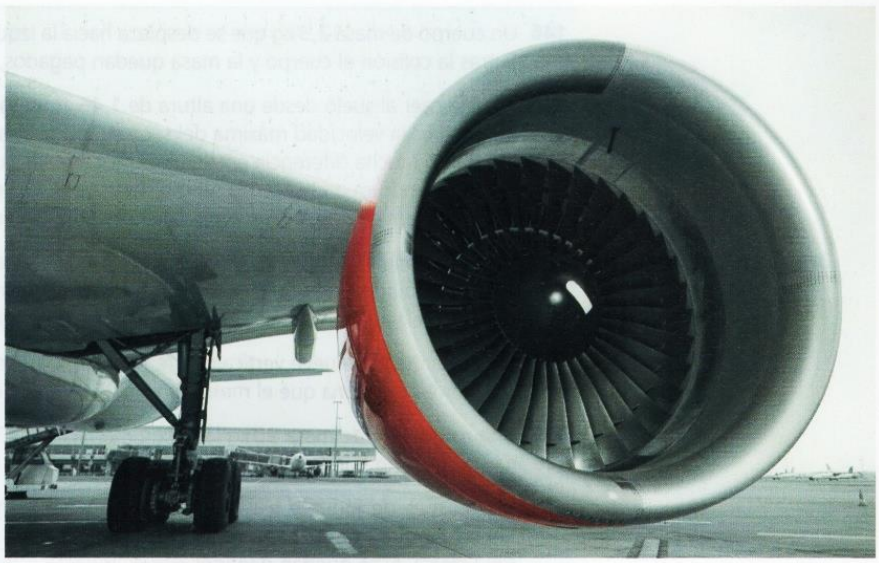


Figura 2.136
Motor a propulsión

154 Un motor de cohete de una nave espacial de masa total 10 000 kg, eyecta 1,4 kg de gases a alta temperatura cada segundo a una velocidad discontinua de 240 $m\,s^{-1}$ (en promedio).
- **a** ¿Cuál es la fuerza ejercida sobre la nave espacial?
- **b** ¿Cuál es la aceleración de la nave espacial?
- **c** Si el motor de cohete funciona durante 30 s, ¿qué impulso proporciona a la nave espacial?
- **d** ¿Cuál es el cambio de velocidad?



Figura 2.137

155 **a** Utiliza la tercera ley de Newton para explicar cómo puede sustentarse en el aire el helicóptero de la Figura 2.137.
b Las palas de la hélice proporcionan momento descendente al aire. Aplica la ley de conservación del momento a esta situación.

Enlace con la teoría del conocimiento

Las reglas pueden restringir la imaginación

Las leyes de conservación ¿restringen o favorecen el desarrollo de la física?

La «simplicidad» de las leyes de conservación y el hecho de que se puedan aplicar de forma general las hace muy útiles y muy interesantes desde el punto de vista conceptual. Sin embargo, se podría argumentar que su aceptación incondicional entre los científicos puede llegar a impedir la consideración de nuevas perspectivas e ideas.

Colisiones elásticas, colisiones inelásticas y explosiones

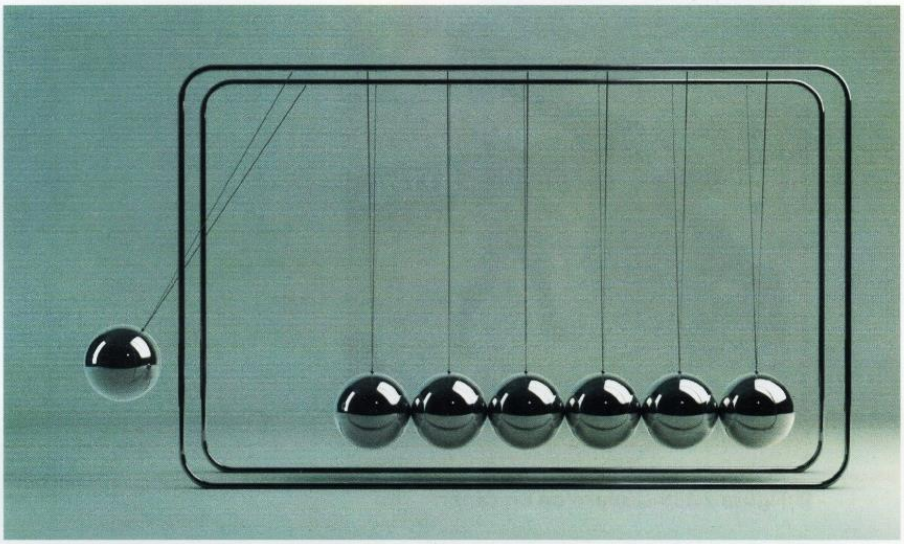
Cuando los objetos entran en contacto (es decir, interactúan), y se ejercen fuerzas mutuamente durante periodos de tiempo relativamente cortos, hablamos de «colisiones». Normalmente cabe esperar que en una colisión parte (o la totalidad) de la energía cinética de los objetos macroscópicos se disipe, pero es importante definir el *caso extremo*:

Hablamos de **colisión elástica** cuando la energía cinética total de las masas es la misma antes y después de la colisión.

En la vida diaria, en el mundo a gran escala, las *colisiones elásticas* son imposibles porque siempre se disipa algo de energía hacia el entorno.

El momento se conserva en *todas* las colisiones y en el caso teórico extremo de una colisión elástica, también se conserva la energía cinética. Las dos ecuaciones de conservación que representan esta situación se pueden combinar de forma simultánea para predecir exactamente qué sucedería si tuviera lugar una colisión elástica (pero *no* es temario de este curso). Por ejemplo, si una masa colisiona elásticamente con otra masa idéntica en reposo, la única posibilidad es que la masa en movimiento se detenga y la otra masa salga despedida con la misma velocidad que la primera. El propósito científico del péndulo de Newton (Figura 2.138) es justamente demostrar este efecto.

Figura 2.138
Péndulo de Newton



Las colisiones en las que parte (o la totalidad) de la energía cinética se transfiere en otras formas de energía se denominan **colisiones inelásticas**. Todas las colisiones de los objetos cotidianos son inelásticas.

Una colisión en la que los objetos se quedan pegados se denomina **colisión totalmente inelástica**.

En una «explosión», las masas que estaban originalmente en reposo relativo son propulsadas en distintas direcciones, de manera que la energía cinética después de la explosión es mayor que antes de esta. Atendiendo a la definición, este tipo de interacción claramente no se puede describir como una colisión *elástica* pero sí sería análoga a una colisión totalmente *inelástica* al revés.



Se puede estudiar fácilmente el porcentaje de conservación de la energía cinética total en colisiones entre masas que se desplazan por una misma recta midiendo las masas y sus velocidades antes y después del impacto, aunque para que los resultados sean fiables se necesita una superficie con muy baja fricción. Es instructivo investigar cómo varían los resultados obtenidos en función de las masas y/o la naturaleza de las superficies de colisión. Habitualmente los objetos fabricados con materiales elásticos, como el acero y el caucho, conservan la mayor parte de la energía cinética. (Recordemos que los materiales elásticos recuperan su forma original una vez se deja de aplicar la fuerza que actuaba sobre ellos). Y a la inversa, los materiales inelásticos se deforman permanentemente y gran parte de la energía se disipa en forma de energía interna y energía térmica.

Cuando se trata de moléculas individuales no tiene sentido utilizar los conceptos de energía interna, sonido y deformación para describirlas. Por tanto, a escala microscópica, las colisiones entre partículas (como las moléculas de un gas) son generalmente elásticas y se pueden modelizar fácilmente mediante simulaciones de ordenador.

156 Una vagoneta de masa 8340 kg que viaja a $14{,}3\,m\,s^{-1}$ colisiona con otra vagoneta de masa 6420 kg que viaja a $8{,}78\,m\,s^{-1}$ en la misma dirección.

a Si después de la colisión ambas vagonetas se quedan pegadas, ¿cuál es su velocidad inicial?

b Calcula el porcentaje de energía cinética que se conserva en la colisión.

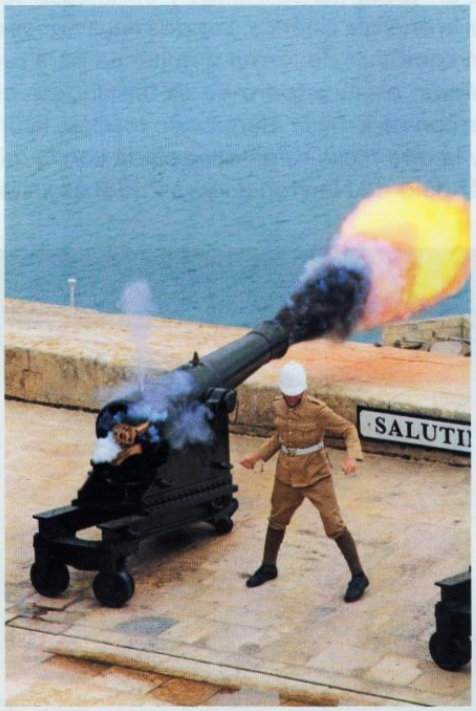
157 Un carrito de masa 2,0 kg se mueve a una velocidad de $1{,}3\,m\,s^{-1}$ directamente hacia otro carrito en reposo de masa 1,0 kg.

a Si inmediatamente después de la colisión el carrito de 1 kg se mueve a una velocidad de $1{,}4\,m\,s^{-1}$, ¿cuál es la velocidad del otro carrito?

b Calcula la cantidad de energía disipada en esta colisión.

158 Si en la pregunta anterior la velocidad del carrito de 1 kg después de la colisión fuera de $4{,}1\,m\,s^{-1}$ (en lugar de $1{,}4\,m\,s^{-1}$), explica por qué todavía se podría calcular la respuesta al apartado **a** pero no así la del apartado **b**.

159 Un cañón de masa 1100 kg dispara un proyectil de masa 6,2 kg a una velocidad de $190\,m\,s^{-1}$ (Figura 2.139).



■ **Figura 2.139** *Disparo de un cañón*

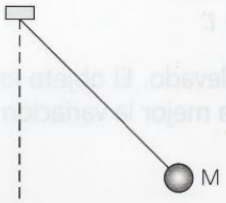
a Calcula la velocidad de retroceso inicial del cañón.

b El objetivo de disparar el cañón es transferir energía química del explosivo a energía cinética del proyectil, pero también se le transfiere energía cinética al cañón. Calcula el porcentaje de energía cinética que se lleva el proyectil.

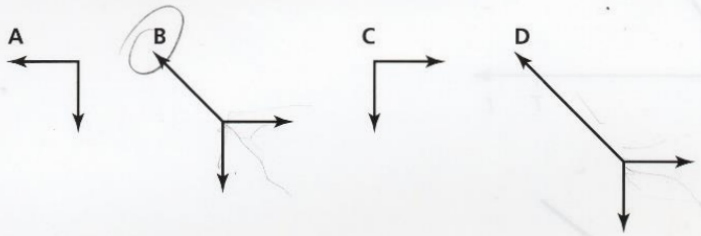
Selección de preguntas de examen

Hoja 1 preguntas del IB y preguntas tipo IB

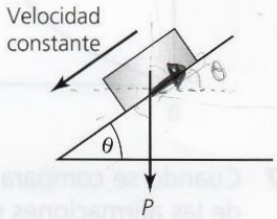
1 En el extremo de una cuerda ligera se encuentra una pequeña masa M, que ha sido desplazada lateralmente mediante una fuerza que la mantiene en estado de reposo.



¿Cuál de los cuatro diagramas siguientes reproduce con exactitud el diagrama de cuerpo libre que representa las fuerzas que actúan sobre la masa?



2 Un objeto de peso P se desliza hacia abajo por una pendiente (plano inclinado) que forma un ángulo θ con la horizontal. Si el objeto se mueve a velocidad constante, ¿cuál es el módulo de la fuerza de fricción en sentido ascendente?



A. P
B. $P \operatorname{sen} \theta$
C. $P \cos \theta$
D. $\frac{P}{2}$

3 El trabajo realizado cuando una fuerza constante actúa sobre una masa es siempre igual a:

A. la magnitud de la fuerza multiplicada por la distancia que se ha desplazado la masa
B. la magnitud de la fuerza multiplicada por el desplazamiento perpendicular a la fuerza
C. la magnitud de la fuerza multiplicada por el desplazamiento en la dirección de la fuerza
D. el vector suma de la fuerza más la distancia que se ha desplazado la masa.

4 Un cohete está viajando por el espacio cuando su motor eyecta gases de masa total m en un tiempo t. La velocidad relativa de los gases respecto al cohete es v.
¿Cuál de las expresiones siguientes es la que representa correctamente la fuerza ejercida por los gases sobre el cohete?

A. mv
B. $\frac{mv}{2}$
C. mvt
D. $\frac{mv}{t}$

5 ¿Cuál de las siguientes expresiones corresponde a la definición correcta de la velocidad instantánea de un objeto en movimiento en un instante *t*?

A. $\frac{\text{distancia recorrida}}{\text{tiempo invertido}}$

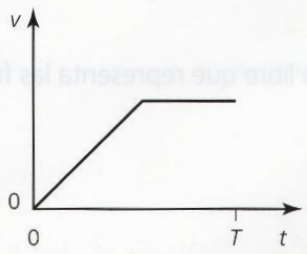
B. $\frac{\text{desplazamiento}}{\text{tiempo invertido}}$

C. tasa de cambio del desplazamiento en el instante *t*

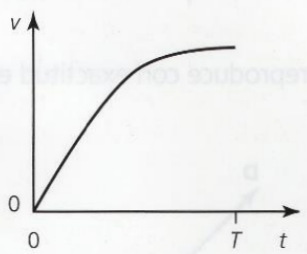
D. tasa de cambio de la distancia en el instante *t*.

6 Se deja caer un objeto grande desde un lugar elevado. El objeto impacta contra el suelo en el instante *T* después de su caída. ¿Cuál de los gráficos siguientes representa mejor la variación de la velocidad del objeto, *v*, con respecto al tiempo, *t*, justo antes del impacto contra el suelo?

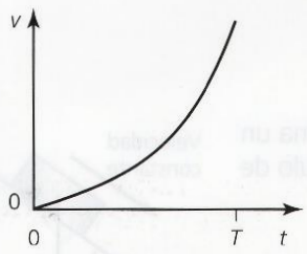
A



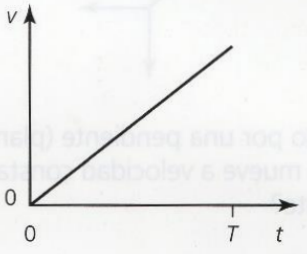
B



C



D



7 Cuando se compara el movimiento de dos coches, se determina que el coche A es más potente que el coche B. ¿Cuál de las afirmaciones siguientes debe cumplirse?

A. El coche A produce más energía útil que el coche B.

B. El coche A produce una fuerza mayor que el coche B.

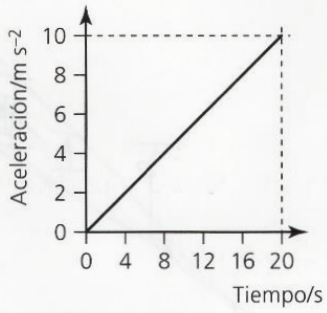
C. En un mismo periodo de tiempo, el coche A realiza más trabajo útil que el coche B.

D. En un mismo periodo de tiempo, el coche A recorre una mayor distancia que el coche B.

8 Se empuja una masa de 5 kg para que suba por una pendiente a una velocidad constante de $2\,m\,s^{-1}$. Cuando alcanza una altura vertical de 4 m, el trabajo total realizado es de 1200 J. El trabajo empleado en vencer la fricción es de:

A. 1000 J **B.** 200 J **C.** 2400 J **D.** 1400 J

9 Sobre un objeto actúa una fuerza creciente y la aceleración aumenta a su vez tal como se muestra en la gráfica.



Si el objeto se encontraba inicialmente en reposo, ¿cuál será su velocidad al cabo de 20 segundos?

A. $0{,}5\,m\,s^{-1}$ **B.** $2{,}0\,m\,s^{-1}$ **C.** $100\,m\,s^{-1}$ **D.** $200\,m\,s^{-1}$

10 Si sobre un objeto no actúa ninguna fuerza resultante, ¿cuál de las magnitudes siguientes también debe ser igual a cero?

A. rapidez **B.** velocidad **C.** aceleración **D.** momento

11 Un motor eléctrico levanta una masa de 2,5 kg una distancia de 12 m en un tiempo de 6 s. Si la eficiencia del proceso es del 20%, ¿cuál es la potencia de entrada del motor?

A. 10 W **B.** 25 W **C.** 250 W **D.** 500 W

12 Una masa se mueve a una velocidad constante con una energía cinética E_C. ¿Cuál es la energía cinética de otra masa que es el doble de la primera y que lleva la mitad de su velocidad?

A. $\frac{E_c}{2}$ **B.** E_c **C.** $2E_c$ **D.** $4E_c$

13 Un vehículo sube por una colina a velocidad constante. ¿Cuál de las expresiones siguientes describe mejor los cambios de energía asociados?

A. La energía química se convierte en energía potencial gravitatoria.
B. La energía química se convierte en energía potencial gravitatoria, sonido y energía térmica.
C. La energía potencial gravitatoria se convierte en energía química.
D. La energía potencial gravitatoria se convierte en energía química, sonido y energía térmica.

© *IB Organization*

14 Un peso *P* se suspende del techo colgándolo del extremo de un trozo de cuerda. Según la tercera ley del movimiento de Newton debe haber otra fuerza igual y de sentido contrario al peso. Esta segunda fuerza es:

A. La fuerza hacia abajo que ejerce la cuerda sobre el techo.
B. La fuerza hacia arriba que ejerce la cuerda sobre el peso.
C. La fuerza hacia arriba que ejerce el peso sobre la Tierra.
D. La tensión de la cuerda.

15 Se lanza una piedra al aire con un cierto ángulo respecto a la horizontal. Si consideramos que la resistencia del aire es despreciable, ¿cuál de las siguientes cantidades *no* permanece constante mientras la piedra se está moviendo por el aire?

A. la componente horizontal de la velocidad
B. la componente vertical de la velocidad
C. la energía total de la piedra
D. la aceleración de la piedra.

16 Se deja caer una bola de acero que estaba en reposo en el interior de un cilindro que contiene aceite. ¿Cuál de las afirmaciones siguientes es incorrecta?

A. La fuerza que se opone al movimiento se llama resistencia aerodinámica.
B. Si el cilindro es lo bastante largo la bola alcanzará su velocidad terminal.
C. El peso de la bola se reducirá dentro del aceite.
D. Una bola más grande experimentará una mayor fuerza resistiva.

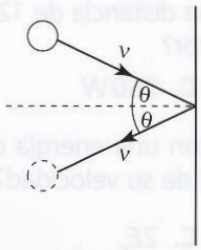
17 Cuando un muelle de acero en reposo se alarga 10 cm, la energía potencial elástica almacenada en su interior es 0,20 J. ¿Cuál es la constante de fuerza del muelle?

A. $4{,}0 \times 10^{-3}\,\mathrm{N\,m^{-1}}$
B. $4{,}0\,\mathrm{N\,m^{-1}}$
C. $10\,\mathrm{N\,m^{-1}}$
D. $40\,\mathrm{N\,m^{-1}}$

18 Se deja caer una pelota sobre una superficie dura y los alumnos determinan que se trata de una colisión elástica. Para que esto sea cierto, la pelota debe:

A. rebotar hasta la misma altura desde la que se dejó caer
B. estirarse mucho
C. estar fabricada de caucho
D. calentarse.

19 Un átomo de gas que lleva una velocidad v impacta contra una pared con un ángulo θ respecto a la normal de la pared. El átomo rebota con la misma velocidad v y ángulo θ.



¿Cuál de las respuestas siguientes da el módulo del cambio de momento del átomo de gas?

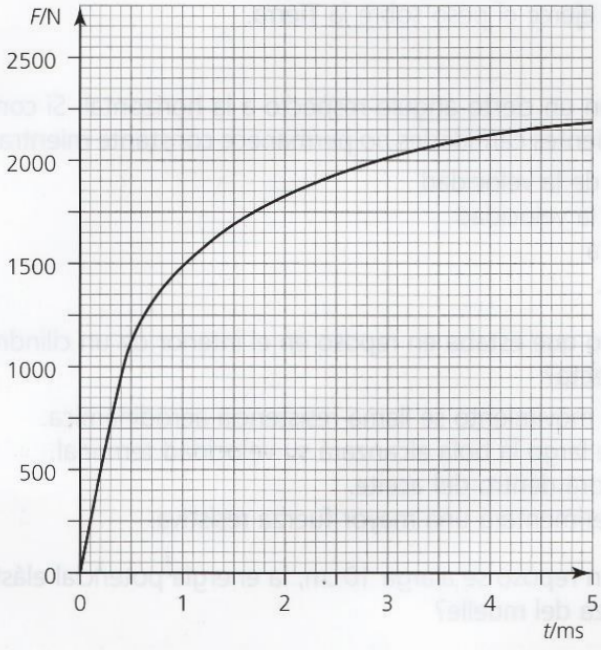
A. cero
B. $2mv\,\text{sen}\,\theta$
C. $2mv$
D. $2mv\cos\theta$

© IB Organization

Hoja 2 preguntas del IB y preguntas tipo IB

1 Se dispara una bala de masa 32 g con un fusil. En la gráfica se representa la variación de la fuerza F sobre la bala con respecto al tiempo t cuando la bala atraviesa el cañón del fusil.

A.



La bala se dispara en el instante de tiempo $t = 0$ y la longitud del cañón es 0,70 m.

a. Explica por qué no es adecuado utilizar la ecuación $e = ut + {}^1/_2\,at^2$ para calcular la aceleración de la bala. (2)

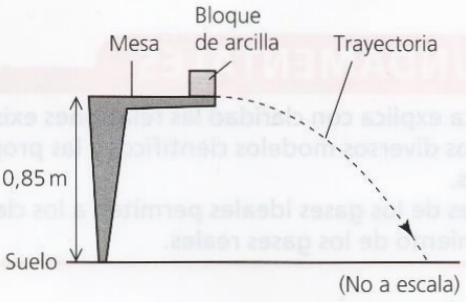
b. Utiliza la gráfica para:
  i. determinar la aceleración media de la bala durante los últimos 2,0 ms de la gráfica (2)
  ii. demostrar que el cambio en el momento de la bala cuando atraviesa la longitud del cañón es aproximadamente 9 N s. (3)

c. Utiliza la respuesta al apartado **b ii** para calcular:
  i. la velocidad de la bala cuando sale del cañón (2)
  ii. la potencia media que se le ha proporcionado a la bala. (3)

d. Utiliza la tercera ley de Newton para explicar por qué retrocede el fusil cuando se dispara la bala. (3)

© IB Organization

2 Un bloque de arcilla que se encuentra inicialmente en el extremo de una mesa sale disparado de esta tal como se muestra en el diagrama.



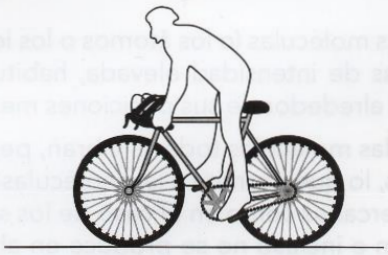
La velocidad inicial del bloque de arcilla es 4,3 $m\,s^{-1}$ horizontalmente. La superficie de la mesa se encuentra a 0,85 m del suelo.

a. Sin tener en cuenta la resistencia del aire, calcula la distancia horizontal recorrida por el bloque de arcilla antes de que impacte contra el suelo. (4)

b. En el diagrama se representa la trayectoria del bloque de arcilla cuando no se tiene en cuenta la resistencia del aire. Copia el diagrama y dibuja sobre él la forma aproximada de la trayectoria que seguiría el bloque de arcilla si tuviéramos en cuenta la acción de la resistencia del aire. (3)

© IB Organization

3 **a.** Consideremos el sistema formado por un ciclista y su bicicleta viajando a velocidad constante por una vía horizontal.



i. Enuncia el valor de la fuerza neta que actúa sobre el ciclista. (1)

ii. Haz una copia del diagrama y dibuja flechas convenientemente etiquetadas que representen las fuerzas verticales que actúan sobre la bicicleta. (2)

iii. Con referencia a las fuerzas horizontales que actúan sobre el sistema, explica por qué este viaja a velocidad constante. (2)

b. La fuerza resistiva total que actúa sobre el sistema es de 40 N y su velocidad es de 8,0 $m\,s^{-1}$. Calcula la potencia de salida útil del ciclista. (1)

c. El ciclista deja de pedalear y el sistema se queda en reposo. La masa total del sistema es de 70 kg.

i. Calcula el módulo de la aceleración lineal del sistema. (2)

ii. Estima la distancia que recorre el sistema desde el momento en que el ciclista deja de pedalear hasta que se queda en reposo. (2)

iii. Enuncia y explica un motivo por el que tu respuesta al apartado **c ii** es solo una estimación. (2)

© IB Organization

4 **a.** Explica la diferencia entre los coeficientes estáticos de fricción y los coeficientes dinámicos de fricción. (2)

b. Un cubo metálico está en reposo sobre un plano inclinado de madera con una superficie lisa. El ángulo que forma el plano inclinado con la horizontal se va aumentando lentamente justo hasta que el cubo comienza a deslizarse por la pendiente. Si el coeficiente de fricción estática entre ambas superficies es 0,56, ¿cuál es el mayor ángulo posible que puede tener el plano inclinado antes de que el cubo comience a deslizarse? (2)

3 Física térmica

IDEAS FUNDAMENTALES

- La física térmica explica con claridad las relaciones existentes entre las medidas macroscópicas obtenidas en los diversos modelos científicos y las propiedades microscópicas que subyacen en dichos modelos.
- Las propiedades de los gases ideales permiten a los científicos establecer predicciones acerca del comportamiento de los gases reales.

3.1 Conceptos térmicos

La física térmica explica con claridad las relaciones existentes entre las medidas macroscópicas obtenidas en los diversos modelos científicos y las propiedades microscópicas que subyacen en dichos modelos

Teoría molecular de los sólidos, líquidos y gases

El conocimiento de la composición particulada de la materia es esencial para el establecimiento de los principios fundamentales que rigen la física, la química y muchas otras disciplinas de la ciencia.

- En los **sólidos**, las moléculas (o los átomos o los iones) se mantienen muy cercanas gracias a la acción de fuerzas de intensidad elevada, habitualmente siguiendo patrones regulares. Las partículas vibran alrededor de sus posiciones medias. Véase la Fig. 3.1.
- En los **líquidos**, las moléculas todavía vibran, pero las fuerzas de interacción molecular pueden ser vencidas, lo que permite a las moléculas desplazarse un poco. Las moléculas permanecen casi tan cercanas como en el caso de los sólidos, pero apenas se produce regularidad en su disposición e incluso no se produce en absoluto, ya que la disposición cambia constantemente.
- En los **gases**, las moléculas están mucho más separadas que en los sólidos o en los líquidos, y las fuerzas de interacción molecular son muy débiles, incluso despreciables (excepto en el caso de colisión molecular). Como consecuencia, las moléculas se mueven de forma independiente y en direcciones aleatorias, siguiendo un amplio intervalo de velocidades (habitualmente elevadas). Las velocidades cambian constantemente como resultado de las colisiones.

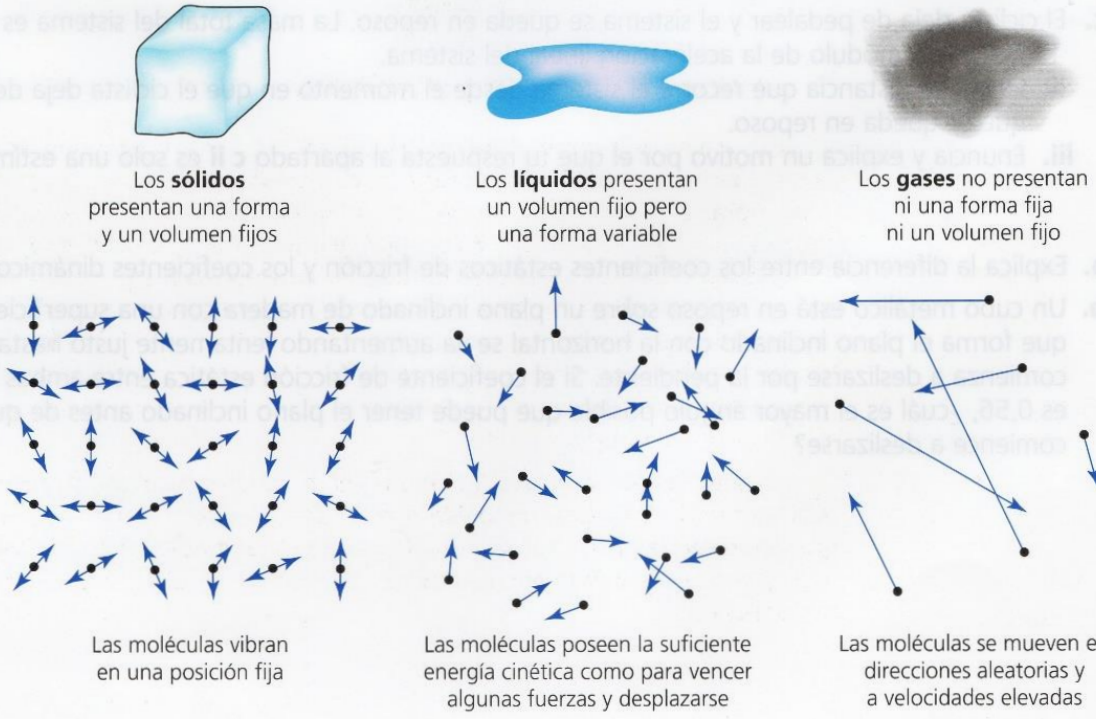


Figura 3.1
Diferencias entre sólidos, líquidos y gases; las flechas representan las velocidades de las moléculas

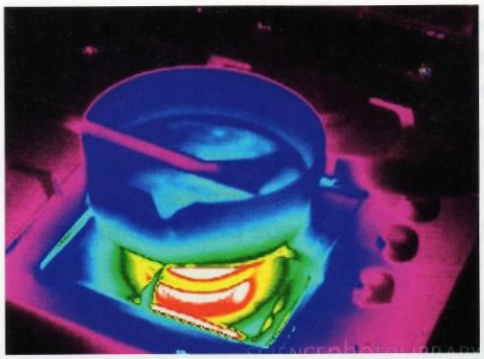


Figura 3.2 *En este termograma, obtenido mediante radiación infrarroja, se utilizan colores para mostrar las distintas temperaturas que se alcanzan en una cacerola sobre un fogón. La escala va desde el blanco (más caliente) hasta el rosa (más frío), pasando por el rojo, el amarillo, el verde y el azul*

Energía térmica y diferencias de temperatura

La energía térmica se define como la energía transferida desde un punto más caliente a otro más frío como consecuencia de una diferencia de temperatura. A la **energía térmica** se la suele denominar «calor», pero esta denominación puede resultar confusa, porque el término calor se emplea de forma habitual y *erróneamente* para nombrar la energía que hay *en el interior* de la materia. La energía que hay en el interior de la materia se denomina **energía interna**.

Los objetos intercambian continuamente energía con el medio que los rodea. Un objeto que está más caliente que el medio desprende (*emite*) más energía de la que capta y un objeto que está más frío que el medio capta (*absorbe*) más energía de la que desprende.

En la Figura 3.2 se muestran las diferencias de temperatura que existen entre una cacerola y un fogón y que dan lugar a un flujo de energía térmica. La energía térmica *siempre* se transfiere desde una temperatura más alta hacia una temperatura más baja.

La **temperatura** determina la dirección de la transferencia neta de energía térmica entre dos objetos.

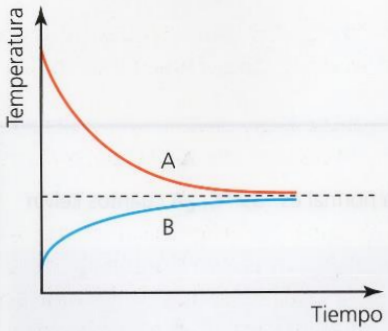


Figura 3.3 *Dos objetos (A y B) a diferentes temperaturas y aislados de su entorno (pero no entre sí) alcanzarán el equilibrio térmico*

Consideremos a continuación el ejemplo simple de dos objetos (o sustancias) a diferentes temperaturas y capaces de transferirse energía térmica, aunque aislados de todo aquello que les rodea (su *entorno*). El objeto más caliente transfiere energía al más frío, enfriándose. Simultáneamente, el objeto más frío se calienta. A medida que la diferencia de temperatura entre ambos objetos disminuye, otro tanto le ocurre a la *tasa* de energía térmica transferida. Este fenómeno se representa en la Figura 3.3, que muestra cómo debería cambiar la temperatura de dos objetos (A y B) cuando se sitúan en contacto térmico. (Estar en «contacto térmico» significa que, de algún modo, pueden transferirse energía térmica). Finalmente, ambos objetos alcanzan la misma temperatura.

Si la temperatura ha dejado de cambiar y ambos objetos están a la misma temperatura, se dice que ambos objetos están en **equilibrio térmico** y en este caso no existe flujo neto de energía térmica entre ambos.

En una situación real no es posible aislar completamente dos objetos de su entorno, de manera que el equilibrio térmico se convierte en un concepto ideal. La idea de que los objetos más calientes se enfríen y los más fríos se calienten sugiere un concepto importante: al final, *todo* acabará teniendo la misma temperatura.

Temperatura y temperatura absoluta

Las escalas de temperatura que se utilizan en la actualidad fueron diseñadas en función de su simplicidad y de su facilidad de reproducción. En la **escala Celsius** (**°C**), a veces denominada escala centígrada, el valor 0 °C se define como la temperatura a la que el agua pura se convierte en hielo (a una presión atmosférica normal), y el valor 100 °C se define como la temperatura a la que el agua pura hierve (a una presión atmosférica normal). Es importante tener en cuenta que esta escala de temperatura fue diseñada por conveniencia, es decir, que estos valores fueron *escogidos*, no fueron descubiertos. En particular, el valor 0 °C no es en absoluto un valor «cero» de temperatura ni un valor «cero» de energía. No tiene otro significado que el de corresponder a la temperatura de fusión del hielo. (Por ejemplo, un objeto a 10 °C no puede considerarse «dos veces más caliente» que un objeto a 5 °C).

La escala de temperatura Celsius se utiliza en todo el mundo y representa un buen ejemplo de que la efectividad de la comunicación de datos entre las diversas personas y países depende en gran medida de haber acordado un sistema de unidades. Por motivos históricos y culturales, hay unos pocos países (en especial los EE. UU.) en los que todavía se utiliza la escala Fahrenheit de temperatura.

Una vez se predijo que prácticamente todo movimiento molecular se detiene a la temperatura de –273 °C tuvo sentido establecer este valor como el verdadero «cero» de la temperatura. A esta temperatura se la denomina habitualmente **cero absoluto**.

La **escala de temperatura (absoluta) Kelvin** corresponde a una adaptación de la escala Celsius en la que el valor «cero» se sitúa en –273 °C (para ser más exactos, en –273,15 °C). En esta escala la unidad se denomina **kelvin, cuyo símbolo es K** (y no °K). Los *cambios* correspondientes a la temperatura de 1°C y 1 K se escogieron de modo que fueran idénticos, lo que permite una conversión más directa entre los valores de una escala y otra:

$$T/\text{K} = \theta/°\text{C} + 273$$

En la ecuación anterior cabe destacar que el uso del símbolo T para la temperatura implica el uso de la escala Kelvin y que el símbolo θ implica, a su vez, el uso de la escala Celsius. En la Tabla 3.1 se comparan los valores de algunas temperaturas importantes en ambas escalas.

Cuando se realizan cálculos referidos a *cambios* de temperatura se pueden emplear ambas escalas, tanto la Celsius como la Kelvin, pero es importante recordar que cuando los cálculos se refieren a una única temperatura, debe utilizarse la escala Kelvin.

■ **Tabla 3.1** *Comparación de temperaturas en grados Celsius y kelvin*

Temperatura	°C	K
Cero absoluto	–273	0
Punto de fusión del agua	0	273
Temperatura corporal	37	310
Punto de ebullición del agua	100	373

Ejemplo resuelto

1 El punto de congelación del mercurio en condiciones de presión atmosférica normal es –39 °C. ¿A cuántos kelvin equivale esta temperatura?

$T/\text{K} = \theta/°\text{C} + 273$

$T = -39 + 273$

$T = 234\,\text{K}$

1 **a** La temperatura mundial más alta y más baja documentadas corresponden respectivamente a los valores 57 °C (en California) y –89 °C (en la Antártida). ¿A cuántos kelvin equivalen estos valores?
b La temperatura de una masa de agua aumenta de 17 °C a 55 °C. ¿Cuál es el aumento de temperatura en kelvin?

2 **a** El volumen de un gas es 37 cm^3 a una temperatura de 23 °C. Si el volumen es proporcional a la temperatura absoluta (K), a qué temperatura en °C corresponderá un volumen de 50 cm^3?
b ¿Cuál será el volumen cuando el gas esté a –15°C?

Energía interna

Toda sustancia contiene partículas en movimiento. En el contexto de este capítulo, la palabra «partícula» es un término general que puede aplicarse tanto a una molécula como a un átomo o a un ion. Aunque los diversos tipos de sustancias pueden contener cualquiera de estas «partículas» o todas ellas, la mayoría de las sustancias son *moleculares*, de modo que en lo que queda de capítulo el término «molécula» se utilizará para describir las partículas de cualquier sustancia.

Las moléculas en movimiento poseen *energía cinética*. Las moléculas pueden moverse de distintas maneras, lo que da lugar a tres formas distintas de energía cinética molecular aleatoria:

- Las moléculas pueden vibrar alrededor de posiciones fijas (como en el caso de un sólido) –las moléculas tienen **energía cinética de vibración**.
- Las moléculas pueden desplazarse de un lugar a otro (movimiento de traslación) –las moléculas tienen **energía cinética de traslación**.
- Las moléculas también pueden girar (rotar) –las moléculas tienen **energía cinética de rotación**.

Las moléculas pueden poseer *energía potencial* además de energía cinética. En sólidos y en líquidos son las *fuerzas eléctricas* (entre las partículas cargadas) las que impiden que las moléculas se separen o se muevan muy cerca unas de otras. Si hay fuerzas eléctricas habrá energía potencial en el sistema, del mismo modo que la energía potencial gravitatoria se asocia a la fuerza gravitatoria.

En los gases, sin embargo, las fuerzas entre las moléculas suelen ser despreciables debido a la mayor separación entre moléculas. Por este motivo, las moléculas de un gas pueden desplazarse libremente y de forma aleatoria. Así, las moléculas de un gas poseen habitualmente una energía potencial eléctrica despreciable, de modo que la totalidad de la energía aparece en forma de energía cinética.

Por tanto, para expresar la energía total de las moléculas de una sustancia necesitamos tener en cuenta tanto la energía cinética como la potencial. Este valor total se denomina *energía interna* de la sustancia y se define de la manera siguiente:

La **energía interna** de una sustancia es la suma de la energía cinética aleatoria total más la energía potencial intermolecular total del conjunto de las moléculas que hay en el interior de la sustancia.

Es importante no confundir el término «energía interna» con el término «calor». Es decir, no debe emplearse el término «energía térmica» (o calor) para referirse a la energía interna.

En la definición de energía interna que se ha establecido anteriormente, la palabra «aleatoria» significa que los movimientos moleculares son **desordenados** e impredecibles. Es decir, no están asociados de ningún modo entre sí ni siguen un **orden**, como ocurriría si se estuvieran moviendo conjuntamente, como ocurre en las moléculas de un movimiento macroscópico como es el de un coche que se desplaza. En este caso las moléculas poseen tanto la energía cinética «ordenada» correspondiente al movimiento macroscópico como la energía cinética «aleatoria» correspondiente a la energía interna.

Resumen de las diferencias entre temperatura, energía interna y energía térmica

Los conceptos de temperatura, energía interna y energía térmica se utilizan de forma habitual y son conceptos muy importantes en todas las disciplinas científicas, aunque se suelen malinterpretar y utilizar de forma errónea. Para recalcar su importancia, podemos establecer el siguiente resumen en el que se describe su significado.

- La *energía interna* es la energía total (cinética aleatoria y potencial) del conjunto de moléculas que hay en el interior de una sustancia.
- Si la energía se transfiere a una sustancia, ésta adquiere energía interna y sus moléculas se mueven más rápido. Decimos en este caso que la sustancia *se ha calentado*, lo que se mide como un *incremento de temperatura*. En la página 127 se establece una definición más precisa del concepto temperatura.
- La *energía térmica* (calor) es la energía que fluye desde una temperatura más alta a una más baja.

En un caso concreto, al objeto o sustancia que estamos considerando se le denomina **sistema**, y la energía térmica fluye entre el sistema y su **entorno**. Los alumnos saben que la energía térmica se transfiere por **conducción**, **convección** y **radiación**, aunque en este capítulo no es necesario conocer en detalle estos procesos, que se describen más adelante, en el Capítulo 8.

En la Figura 3.4 la energía térmica se conduce desde una mano a la otra.



Figura 3.4
Una mano recibe la energía térmica que desprende la otra

Enlace con la teoría del conocimiento

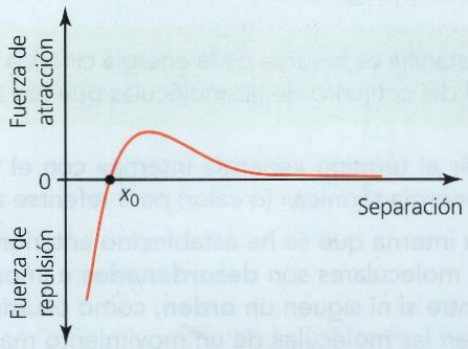
Percepción sensorial

La observación a través de la percepción sensorial desempeña un papel clave a la hora de realizar medidas. ¿Desempeña la percepción sensorial distintos papeles en distintas áreas de conocimiento?

El significado científico de la temperatura está asociado a las energías moleculares microscópicas, pero nuestra apreciación de la temperatura se basa ampliamente en nuestras **percepciones sensoriales** diarias de calor y frío (que son claramente poco fiables). ¿Nos ayuda este hecho o nos entorpece a la hora de comprender qué es la temperatura? ¿Qué otras áreas del conocimiento son tan dependientes de la información proporcionada directamente por el cuerpo a través de los sentidos del tacto, la vista, el oído, etc.?

3 Dos masas iguales de dos sólidos distintos a 20 °C se calientan hasta 40 °C.
- a Razona si ambas masas poseen la misma cantidad inicial de energía interna.
- b Razona si se ha transferido la misma cantidad de energía térmica a ambas masas.

4 En la Figura 3.5 se representa la variación de la fuerza resultante entre dos moléculas respecto a su separación; x_0 corresponde a la separación de equilibrio media entre moléculas en un sólido. Las moléculas de un gas están habitualmente diez veces más separadas que las de un sólido.



■ **Figura 3.5** *Variación de la fuerza intermolecular respecto a la separación molecular*

- a Describe cómo cambia la fuerza resultante entre moléculas (en sus posiciones de equilibrio) si éstas se mueven:
  - i separándose unas de otras.
  - ii acercándose unas a otras.
- b ¿Qué se puede concluir a partir de esta gráfica sobre la intensidad de las fuerzas entre las moléculas de un gas y la de las fuerzas entre las moléculas de un sólido?
- c Explica por qué cabe esperar que la densidad de los gases sea aproximadamente 10^3 veces menor que la de los sólidos.

5 Las chispas emitidas por una bengala (Figura 3.6) están muy calientes. Explicar por qué no suelen causar daños cuando caen sobre una persona o su ropa. Utilizar los términos «temperatura», «energía interna» y «energía térmica» en el razonamiento. (La bengala puede ocasionar quemaduras si se toca directamente)

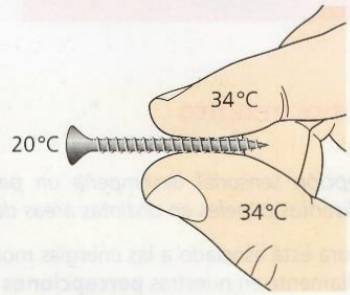


■ **Figura 3.6** *¡Las bengalas no suelen ser tan peligrosas como parecen!*

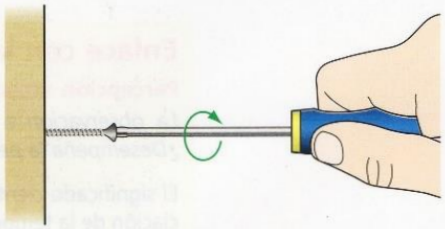
■ Calor y trabajo

Además de aportar energía térmica a un sistema («calentarlo»), existe otro método muy habitual y fundamentalmente distinto de calentar algo: podemos ejercer *trabajo mecánico* sobre el sistema. Un ejemplo simple es el de la fuerza de fricción que produce un aumento de temperatura cuando una superficie se frota contra otra. El calentamiento es una transferencia *no mecánica* de energía.

En las Figuras 3.7 y 3.8 se muestran ejemplos de estos modos distintos de aumentar la temperatura de un objeto. En la Figura 3.7, la energía interna de un tornillo aumenta a medida que gana energía térmica procedente de la mano que lo sujeta. En la Figura 3.8, su energía interna aumenta porque se ejerce una fuerza que hace girar el tornillo para introducirlo en un trozo de madera y que va en sentido contrario a las fuerzas que se oponen a esta introducción, ejerciéndose en este caso un trabajo mecánico.



■ **Figura 3.7** *Calentamiento debido al contacto con algo que está a una temperatura más alta*



■ **Figura 3.8** *Calentamiento debido a que se está ejerciendo un trabajo*

Perspectivas adicionales

Comprender el concepto de calor: James Prescott Joule

La unidad de energía del SI se denomina Joule en honor del británico James Prescott Joule (Figura 3.9), un físico del siglo XIX que además regentaba una fábrica de cerveza. Su experiencia como cervecero pudo haber contribuido a su reconocida habilidad para realizar medidas de precisión, en especial las relacionadas con cambios de temperatura.

A mediados del siglo XIX se creía que el «calor» era un «fluido calórico» indetectable que fluía desde los objetos calientes a los fríos. Joule intentó repetidamente demostrar que el «calor» era, simplemente, otra forma de energía que podía ser transferida de otras muchas formas, por ejemplo como energía cinética o como energía potencial gravitatoria.



Figura 3.9
James Prescott Joule

En particular, se le recuerda por sus experimentos sobre la «equivalencia mecánica del calor», en los que se utilizaba energía mecánica para incrementar la temperatura del agua. Se dice que pasó parte de su luna de miel intentando medir una diferencia de temperatura muy pequeña entre la parte superior y la parte inferior de una cascada, ¡lo cual no es nada fácil!

Su obra permitió unir los conceptos de energía y «calor» y tuvo importancia en el posterior desarrollo de la ley de conservación de la energía y la primera ley de la termodinámica. Joule trabajó también con Lord Kelvin en termometría y escalas de temperatura.

1 El uso del término «calor» puede llevar a confusión, especialmente si se utiliza para representar tanto la energía del interior de los objetos como la energía que se transfiere. Discute el uso del término «calor» según esta perspectiva adicional.

Naturaleza de la ciencia

Las primeras ideas sobre el calor estaban limitadas por el desconocimiento de la naturaleza particulada de la materia

Hace apenas 200 años, el concepto de calor se describía en términos de un vago «**fluido calórico**» que fluía de un objeto caliente. Se trataba de un ejemplo más de una de las muchas teorías científicas serias que se desarrollaron para explicar los fenómenos observados, pero que nunca resultaban totalmente satisfactorias porque no podían explicar *todas* las observaciones. La antigua teoría del «**flogisto**» para explicar la combustión es otro ejemplo de teoría relacionada con el calor.

Desde la perspectiva del siglo XXI, estas teorías pueden parecer poco sofisticadas e inexactas (¡aunque imaginativas!). Sin embargo, deben juzgarse en el contexto de su época, y en aquel tiempo (siglos XVII y XVIII), la teoría molecular de la materia todavía no se había desarrollado, de modo que era imposible disponer de una comprensión del flujo de energía térmica como la que se tiene en la actualidad.

Gráficos de calentamiento y enfriamiento

La línea recta de puntos azules de la Figura 3.10 muestra cómo cambia la temperatura de un objeto calentado de forma constante en función del tiempo, bajo unas circunstancias ideales en las que no hay pérdida de energía térmica (calor). La temperatura aumenta de manera directamente proporcional al tiempo (a una cantidad igual de tiempo le corresponde una cantidad igual de aumento de temperatura). Sin embargo, las pérdidas de energía térmica hacia el entorno son inevitables, de modo que la línea curva roja representa una situación más realista. La curva muestra que la *tasa* de aumento de la temperatura decrece a medida que el objeto se calienta. Esto último se debe a que las pérdidas de energía térmica (desde el objeto hacia su entorno) aumentan cuando las diferencias de temperatura se hacen mayores. Si se continúa suministrando energía, el objeto acaba alcanzando una temperatura constante cuando se igualan la tasa de entrada de energía y la tasa de salida de energía térmica liberada hacia el entorno.

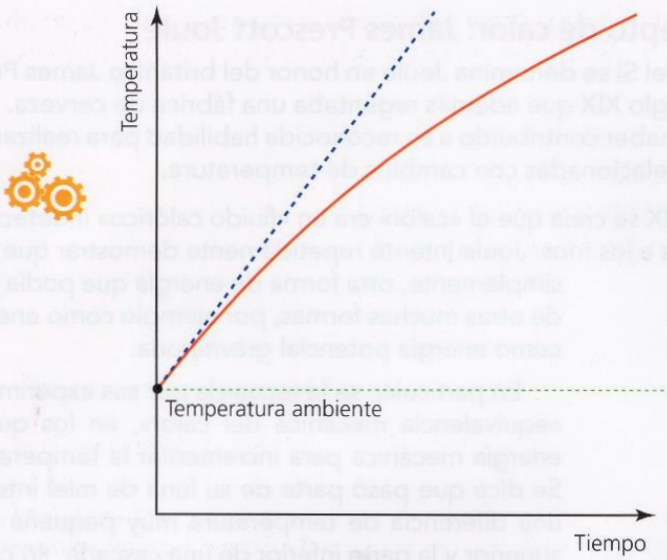


Figura 3.10 *Representación gráfica típica de la variación de la temperatura respecto al tiempo en el caso de enfriamiento a una tasa constante*

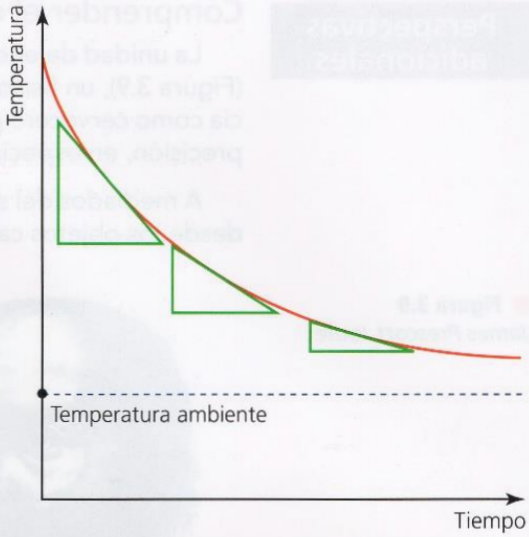


Figura 3.11 *Representación gráfica típica de la variación de la temperatura respecto al tiempo para un objeto que se enfría hasta la temperatura ambiente. Es importante remarcar que el gradiente decrece con el tiempo*

Cuando se deja enfriar un objeto de forma natural, la tasa de emisión de energía térmica disminuye con respecto al tiempo porque dicha tasa también depende de la diferencia de temperatura entre el objeto y su entorno. Esto último puede verse en la Figura 3.11, en la que la tasa de enfriamiento (representada como los gradientes en distintos instantes de tiempo) se hace cada vez menor.

Capacidad calorífica específica y capacidad térmica

Capacidad calorífica específica

Para comparar la respuesta al calentamiento de dos sustancias distintas necesitamos saber cuánta energía térmica incrementa la temperatura de una masa equivalente de cada una de las sustancias (habitualmente 1 kilogramo) en una misma cantidad (1 K o 1 °C). Esto es lo que se denomina *capacidad calorífica específica, c,* de la sustancia. (El término «específica» se utiliza para remarcar que la capacidad calorífica se refiere a una cantidad determinada de materia, concretamente 1 kg).

La **capacidad calorífica específica** de una sustancia es la cantidad de energía necesaria para incrementar en 1 K la temperatura de 1 kg de sustancia. (Unidades: J kg^{-1} K^{-1}, aunque puede utilizarse $°C^{-1}$ en lugar de K^{-1}).

En la Tabla 3.2 se proporcionan los valores de la capacidad calorífica específica de algunos materiales de uso frecuente.

Tabla 3.2 *Algunas capacidades caloríficas específicas correspondientes a distintos materiales*

Material	Capacidad calorífica específica/J kg^{-1} K^{-1}
cobre	390
aluminio	910
agua	4180
aire	1000
tierra seca	1250
vidrio (habitual)	800
hormigón (habitual)	800

En pocas palabras, las sustancias con capacidades caloríficas elevadas se calientan lentamente, comparadas con masas equivalentes de sustancias con capacidades caloríficas más bajas (dada la misma energía de entrada). Análogamente, las sustancias con capacidades caloríficas elevadas se enfrían más lentamente. Cabe destacar que el agua posee una capacidad calorífica inusualmente elevada. Esta es la razón por la que es necesario transferir una gran cantidad de energía para cambiar la temperatura del agua, y la razón por la que el agua se utiliza de forma habitual para transferir energía en los sistemas de calentamiento y enfriamiento.

Si se suministra una cantidad de energía térmica, Q, a una masa, m, y se produce un incremento de temperatura ΔT, podemos calcular la capacidad calorífica específica a partir de la ecuación:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}$$

(Recordemos que el símbolo «delta», Δ, se utiliza de forma habitual en ciencia y en matemáticas para representar un cambio pequeño en una cantidad).

Esta ecuación se suele escribir de la manera siguiente:

$$Q = mc\Delta T$$

Esta ecuación puede encontrarse en el *Apéndice de datos de Física*.

Cuando una sustancia se enfría, la energía térmica emitida se puede calcular mediante dicha ecuación.

La manera más simple de determinar experimentalmente la capacidad calorífica específica de una sustancia es mediante la aplicación de una cantidad conocida de energía procedente de un calentador eléctrico situado en su interior (inmerso en su interior). Este tipo de calentadores se denominan **calentadores de inmersión**. Para el caso de los líquidos es relativamente sencillo, pero para los sólidos suele ser necesario perforar un agujero en el material a fin de insertar el calentador y asegurar un contacto térmico apropiado.

En los dos experimentos que se muestran en las Figuras 3.12 y 3.13 se utiliza un **juliómetro** para medir directamente la energía transferida. (Habitualmente esta energía se puede calcular a partir de los circuitos eléctricos, mediante la ecuación: energía eléctrica = VIt, que se explica en el capítulo 5).

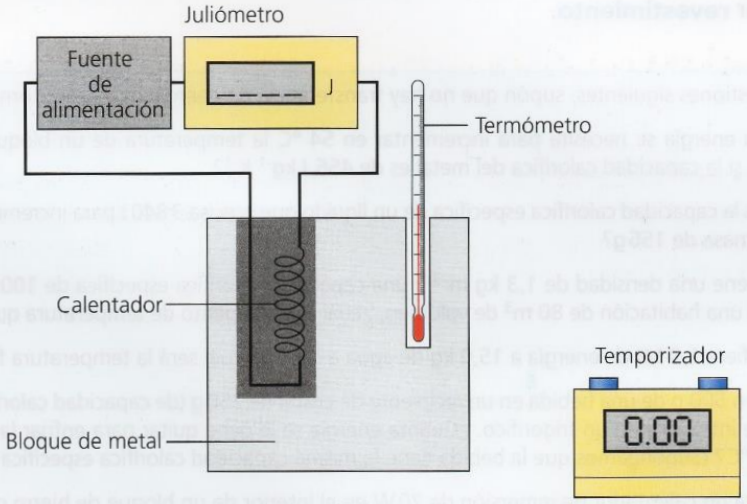


Figura 3.12
Determinación de la capacidad calorífica específica de un metal

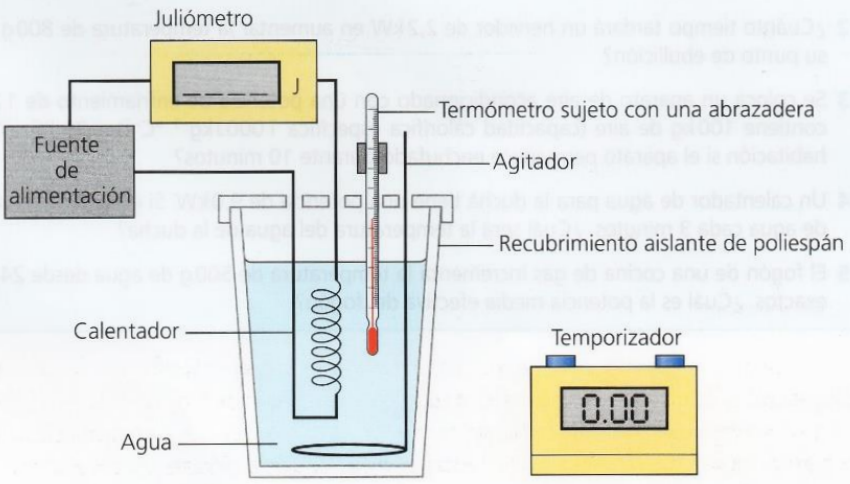


Figura 3.13
Determinación de la capacidad calorífica específica del agua

Ejemplo resuelto

2 Supongamos que el bloque de metal que se muestra en la Figura 3.12 tiene una masa de 1500 g y se calienta durante 5 minutos con un calentador de 18 W. Si la temperatura del bloque aumenta de 18,0 °C hasta 27,5 °C, calcula su capacidad calorífica específica, en el supuesto de que no se transfiera energía al entorno.

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}$$

y

$$Q = Pt$$

por tanto,

$$c = \frac{18 \times (5 \times 60)}{1{,}5 \times (27{,}5 - 18{,}0)}$$

$$= 380\,\text{J kg}^{-1}\,\text{°C}^{-1}$$

Para la realización de estos cálculos debe suponerse que toda la sustancia se encuentra a la misma temperatura y que el termómetro la registra de forma exacta en los instantes relevantes. En la práctica, al no cumplirse dichas suposiciones, los valores calculados pueden ser significativamente inexactos.

Además, en cualquier experimento relacionado con transferencias de energía térmica y con cambios de temperatura se producen pérdidas (o ganancias) inevitables con respecto al entorno. Si se requieren unos resultados exactos, deben emplearse **aislantes** para limitar estas transferencias de energía, que en el ejercicio anterior hubieran conducido a una sobreestimación de la capacidad calorífica específica de la sustancia (dado que parte de la entrada de energía va al entorno en lugar de ir a la sustancia). El proceso para aislar una sustancia habitualmente consiste en envolverla con un material que retiene el aire (que es un mal conductor), y a este proceso se le suele denominar **revestimiento**.

Para las cuestiones siguientes, supón que no hay transferencia de energía hacia el entorno o desde este.

6 ¿Cuánta energía se necesita para incrementar en 54 °C la temperatura de un bloque de metal con una masa de 3,87 kg, si la capacidad calorífica del metal es de 456 J kg^{-1} K^{-1}?

7 ¿Cuál es la capacidad calorífica específica de un líquido que precisa 3840 J para incrementar en 18,0 K la temperatura de una masa de 156 g?

8 El aire tiene una densidad de 1,3 kg m^{-3} y una capacidad calorífica específica de 1000 J kg^{-1} $°C^{-1}$. Si se transfieren 500 kJ a una habitación de 80 m^3 de volumen, ¿cuál es el aumento de temperatura que se produce?

9 Se transfiere 1,0 MJ de energía a 15,0 kg de agua a 18 °C, ¿cuál será la temperatura final?

10 Se vierten 500 g de una bebida en un recipiente de cristal de 250 g (de capacidad calorífica específica 850 J kg^{-1} $°C^{-1}$) y este se introduce en un frigorífico. ¿Cuánta energía se le debe quitar para enfriar la bebida y el vaso desde 25 °C hasta 4 °C? (Supongamos que la bebida tiene la misma capacidad calorífica específica que el agua).

11 Se coloca un calentador de inmersión de 20 W en el interior de un bloque de hierro con una masa de 2,0 kg y una temperatura de 24 °C durante 12 minutos. ¿Cuál será la temperatura final? (Capacidad calorífica específica del hierro = 444 J kg^{-1} $°C^{-1}$).

12 ¿Cuánto tiempo tardará un hervidor de 2,2 kW en aumentar la temperatura de 800 g de agua desde 16,0 °C hasta su punto de ebullición?

13 Se coloca un aparato de aire acondicionado con una potencia de enfriamiento de 1200 W en una habitación que contiene 100 kg de aire (capacidad calorífica específica 1000 J kg^{-1} $°C^{-1}$) a 30 °C. ¿Qué temperatura alcanzará la habitación si el aparato permanece enchufado durante 10 minutos?

14 Un calentador de agua para la ducha tiene una potencia de 9,0 kW. Si el flujo de agua que lo atraviesa es de 15 kg de agua cada 3 minutos. ¿Cuál será la temperatura del agua de la ducha?

15 El fogón de una cocina de gas incrementa la temperatura de 500 g de agua desde 24 °C hasta 80 °C en 2 minutos exactos. ¿Cuál es la potencia media efectiva del fogón?

Intercambios de energía térmica

En la Figura 3.3 se muestra el gráfico temperatura-tiempo correspondiente a dos objetos a diferente temperatura situados en buen contacto término, de manera que la energía térmica se puede transferir relativamente rápido, suponiendo que el sistema está aislado de su entorno. En estas condiciones, *la energía térmica emitida por uno de los objetos es igual a la energía térmica absorbida por el otro*. Los intercambios de energía térmica pueden utilizarse como un medio alternativo para la determinación del calor específico, tal como se ilustra en la cuestión 16, o bien para la determinación de la energía que puede transferir un alimento o un combustible.

El término **calorimetría** se utiliza para describir experimentos en los que se intenta medir de forma precisa los cambios de temperatura debidos a diversos procesos físicos o químicos. Las transferencias de energía se pueden calcular si se conocen las masas y las capacidades caloríficas específicas. En las técnicas calorimétricas pueden ser necesarios unos aparatos, denominados *calorímetros*, diseñados de forma específica para limitar la transferencia de energía térmica desde el entorno o hacia este.

16 Se calienta un tornillo metálico grande de 53,6 g de masa durante bastante tiempo en un horno a 245 °C. Se transfiere el tornillo lo más rápidamente posible desde el horno a un vaso de precipitación que contiene 257,9 g de agua inicialmente a 23,1 °C (Figura 3.14). Se remueve continuamente el agua y la temperatura de esta aumenta hasta alcanzar un máximo de 26,5 °C.

- **a** Calcula la energía transferida al agua.
- **b** ¿Por qué se ha mantenido el tornillo en el horno durante bastante tiempo?
- **c** ¿Por qué se ha realizado la transferencia de forma rápida?
- **d** Calcula la capacidad calorífica específica del material del que está fabricado el tornillo.
- **e** ¿Por qué ha sido necesario remover el agua?
- **f** El valor calculado de la capacidad calorífica específica del tornillo, ¿corresponde a una infraestimación o a una sobreestimación del valor real? Razona la respuesta.



■ **Figura 3.14** *Tornillo metálico caliente sumergido en agua fría*

17 Cuando se queman 14,5 g de un determinado combustible, se transfiere energía térmica a 63,9 g de agua. La temperatura del agua aumenta de 18,7 °C hasta 42,4 °C. Si suponemos que no hay transferencia de energía interna hacia el entorno, calcula la máxima cantidad de energía que puede transferirse a partir de 1 kg de dicho combustible. (Esto último se denomina *energía específica*).

18 Para llenar una bañera con agua, se añaden 84 kg de agua a 54 °C a 62 kg de agua a 17 °C.

- **a** ¿Cuál es la temperatura final del agua?
- **b** ¿Qué supuestos has tenido en cuenta en el cálculo anterior?

19 Se añade arena a una temperatura inicial de 27,2 °C a una masa equivalente de agua a 15,3 °C. Si la capacidad calorífica específica de la arena es $822\,J\,kg^{-1}\,°C^{-1}$ y la capacidad calorífica específica del agua es $4\,180\,J\,kg^{-1}\,°C^{-1}$, ¿cuál será la temperatura final de la mezcla? (Supón que no hay transferencia de energía con el entorno).

Capacidad térmica

Muchos objetos de uso cotidiano no están compuestos de una única sustancia, de modo que no tiene demasiado sentido referirse a una cantidad específica (un kilogramo) de dicho objeto. En estos casos se habla de **capacidad térmica** del objeto como un todo. Por ejemplo, nos puede interesar calcular la capacidad térmica de una habitación y su contenido con el objeto de escoger el aparato de calefacción o de aire acondicionado más apropiado.

La capacidad térmica de un objeto es la cantidad de energía necesaria para incrementar su temperatura 1 K. (Unidad: $J\,K^{-1}$ o $J\,°C^{-1}$).

$$\text{capacidad térmica, } C = \frac{Q}{\Delta T}$$

Ejemplo resuelto

3 ¿Cuánta energía térmica se necesita para incrementar la temperatura de un hervidor y del agua que hay en su interior desde 23 °C hasta 27 °C si su capacidad térmica es $6\,500\,J\,K^{-1}$?

$Q = C\Delta T$

$Q = 6\,500 \times (77 - 23)$

$Q = 3{,}51 \times 10^5\,J$

Para las cuestiones siguientes, supón que no hay transferencia de energía hacia el entorno o desde este.

20 La capacidad térmica de una sartén y su contenido es 7000 JK^{-1}. ¿Cuánto tardará un calentador eléctrico de 1,5 kW en incrementar la temperatura de la sartén y su contenido desde 22 °C hasta 90 °C?

21 Si un calentador de 2,5 kW tardó 32 minutos en incrementar la temperatura de una habitación desde 8 °C hasta 22 °C, ¿cuál era la capacidad térmica de la habitación?

22 Si el contenido de un frigorífico con una potencia de enfriamiento de 405 W tiene una capacidad térmica de 23,9 kJK^{-1}, ¿cuánto tardará en reducirse la temperatura media desde 19,50 °C hasta 5,20 °C?

Aplicaciones

Capacidad térmica y diseño de construcción

En países con clima seco y cálido, mantener el frescor durante el día puede ser un verdadero problema, especialmente si no se puede o no se desea utilizar aire acondicionado. Los habitantes de estos países conocen desde hace siglos las ventajas de construir hogares con paredes gruesas, es decir, con masas grandes y, por tanto, capacidades térmicas elevadas (Figura 3.15). En algunos climas, incluso, es frecuente que la temperatura del aire descienda de forma significativa durante la noche a causa de los niveles bajos de humedad y la falta de nubes, que favorecen la emisión de energía térmica.

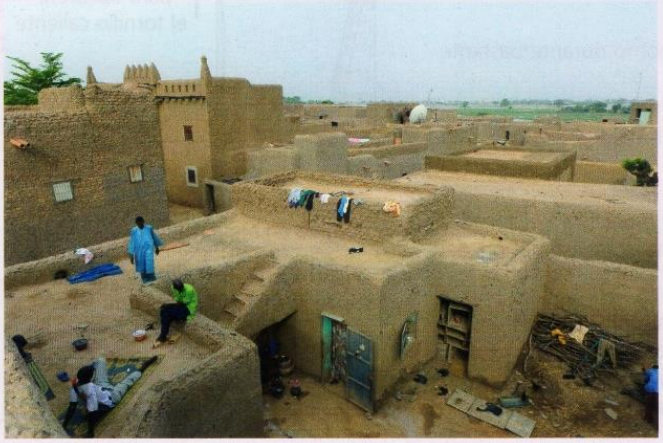


Figura 3.15 *Vivienda tradicional africana de paredes gruesas*

Durante el día, la energía térmica irradiada por el Sol calienta la construcción, de modo que el uso de grandes cantidades de materiales como la tierra y la piedra (que tienen capacidades caloríficas específicas relativamente altas) para la construcción de casas con capacidad térmica elevada, garantiza que el aumento de temperatura durante el día no sea demasiado brusco. Por la noche, por el mismo motivo, la temperatura de la construcción no caerá bruscamente, de manera que los habitantes se mantendrán calientes. Este efecto produce un agradable «retraso térmico», con temperaturas en el interior de la construcción «más frescas» por la mañana y «más cálidas» al final de la tarde o la noche.

En resumen, las construcciones con capacidad térmica elevada «compensan» las temperaturas extremas que, de otro modo, causarían las condiciones climáticas, así como los cambios significativos entre el día y la noche. Es una propiedad muy útil que presentan casi todas las construcciones, estén situadas en climas cálidos o fríos, ya que la mayoría se diseñan con el objeto de que tengan capacidades térmicas elevadas. Sin embargo, el coste económico que tiene el uso de grandes cantidades de materiales, por otra parte innecesarios, limita habitualmente el grosor de las construcciones.

1 a Efectúa una estimación de las diversas cantidades de materiales necesarios para construir una casa similar a la que se muestra en primer plano en la Figura 3.15 y calcula a continuación su capacidad térmica aproximada.

b Suponiendo que en un día cálido la energía térmica irradiada por el Sol llega perpendicularmente al tejado de un edificio a una tasa de 850 $W\,m^{-2}$, calcula el aumento máximo de temperatura producido durante 1 hora a mediodía. Supón que el 5% de la energía térmica se absorbe y se propaga de manera uniforme por todo el edificio. (Es decir, se ha hecho todo lo posible para garantizar que el edificio no absorba la energía radiante que incide sobre él, por ejemplo utilizando colores claros para reflejar la energía incidente).

c El aumento de temperatura calculado en el apartado *b* es, probablemente, mucho más elevado que el que ocurre en la realidad. Sugiere un motivo.

d Esboza un gráfico que represente, a tu modo de ver, la variación de la temperatura del aire de un país de clima cálido y seco a lo largo de un periodo de dos días y noches despejados. A continuación, añade al gráfico la representación de la variación de la temperatura del interior de un edificio construido de forma similar al de la Figura 3.15 durante el mismo periodo de tiempo.

e Sugiere un motivo por el cual la temperatura del aire se mide siempre en la sombra.

Naturaleza de la ciencia

La inevitable transferencia de energía mecánica en energía interna

Sabemos que, sin una fuerza que los impulse hacia delante, todos los objetos en movimiento tienden a decelerarse y acaban deteniéndose a causa de las fuerzas de fricción. A veces es necesario proporcionar fuerzas adicionales para detener un objeto en movimiento, como por ejemplo un coche. En este caso también se recurre habitualmente a las fuerzas de fricción. Cuando dichas fuerzas actúan para frenar el movimiento, la energía cinética ordenada macroscópicamente de las partículas en movimiento se transfiere a las energías cinéticas aleatorias y desordenadas de las partículas de ambas superficies. Se produce un aumento de la energía interna y de la temperatura. También se transfiere energía térmica al entorno.

La transferencia de energía ordenada a energía desordenada no se puede detener ni revertir. Si un objeto en movimiento se ha detenido a causa de la fricción, es simplemente imposible volver a transferir la energía interna aumentada (asociada a las energías cinéticas aleatorias de las moléculas) a la energía cinética ordenada macroscópica del objeto en movimiento. Por este motivo, podemos considerar que se ha «perdido» energía útil en el frenado por fricción.

Consideremos el caso de un coche que se detiene bajo la acción de sus frenos. La fricción entre los neumáticos y la carretera, así como la resistencia del aire sobre la superficie del coche, contribuyen a las fuerzas de resistencia, pero para simplificar podemos suponer que la totalidad de la energía cinética del coche se transfiere para aumentar la temperatura de los frenos (Figura 3.16). Se puede encontrar un ejemplo de este tipo de cálculo en la cuestión 23.

En la caída libre de un objeto se produce una transferencia de energía potencial gravitatoria en energía cinética. Si el objeto no rebota cuando impacta con el suelo, podemos asumir en un primer momento (para facilitar los cálculos) que la totalidad de la energía se transfiere en forma de energía interna del objeto. En otras palabras, no hay transferencia de energía hacia el suelo o hacia el entorno. Un ejemplo interesante es el del agua que cae por una cascada, para la que cabe esperar un aumento de temperatura muy pequeño (Figura 3.17).

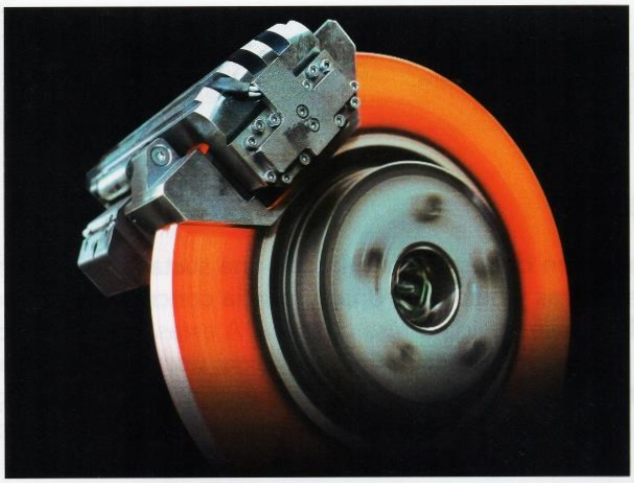


Figura 3.16 *Los discos de freno de un coche pueden calentarse mucho*



Figura 3.17 *La temperatura del agua que cae por una cascada es un poco más elevada en el extremo inferior que en el superior*

23 Un coche de masa total 1 200 kg y que se desplaza a 17,3 $m\,s^{-1}$ tiene cuatro discos de freno, cada uno con una masa de 424 g y capacidad calorífica específica 1 580 $J\,kg^{-1}\,°C^{-1}$.
- **a** Calcula la energía cinética del coche.
- **b** Estima el aumento máximo de temperatura de los frenos cuando se utilizan para decelerar el coche hasta su total detención.
- **c** El aumento real de temperatura es menor que el calculado en el apartado *b*, pero, ¿por qué sería mayor el aumento de temperatura si la deceleración fuera mayor?

24 Una bala con una masa de 12 g y que viaja a 670 $m\,s^{-1}$ (el doble de la velocidad del sonido) impacta sobre un bloque de madera de 650 g.
- **a** Estima el aumento de temperatura si la capacidad térmica combinada de la bala y del bloque es 1 880 $J\,K^{-1}$.
- **b** ¿Qué supuestos has tenido en cuenta?
- **c** Sin efectuar cálculos detallados, ¿qué aumento de temperatura se produciría con una bala similar a la del apartado *a* si viajara a la mitad de su velocidad?

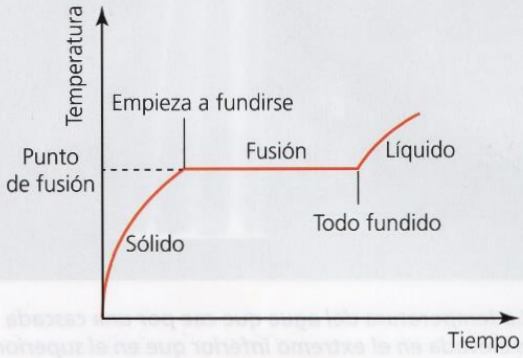
25 Mediante una fuerza constante de 160 N se hace girar una rueda de paletas en el interior de un tanque que contiene 8,00 kg de agua a 18,6 °C (Figura 3.18).
- **a** Si la fuerza de rotación ha producido un desplazamiento total de 250 m, ¿cuál ha sido el trabajo realizado?
- **b** Estima la temperatura final del agua.
- **c** ¿Por qué es difícil demostrar que la energía mecánica se puede transferir directamente en forma de una cantidad equivalente de energía interna?

26 Un trozo de plomo de 1 800 g de masa cae 14,8 m desde el tejado de un edificio.
- **a** Si la capacidad calorífica específica del plomo es 130 $J\,kg^{-1}\,°C^{-1}$ estima el aumento de temperatura del trozo de plomo tras su impacto con el suelo.
- **b** ¿Qué supuestos has tenido que asumir para realizar el cálculo anterior?
- **c** Explica por qué un trozo de plomo con el doble de masa que el anterior experimentaría aproximadamente el mismo aumento de temperatura si cayera desde la misma distancia.

27 La cola de caballo de las cataratas del Niágara tiene una altura de 53 m. ¿Cuál es el máximo aumento posible de temperatura del agua entre la parte superior y la parte inferior de esta catarata?



■ **Figura 3.18** *Aparato de Joule para convertir energía mecánica en energía interna.*



■ **Figura 3.19** *Cambios de temperatura cuando un sólido se calienta y se funde (nótese que las líneas se curvan solo a causa de la energía transferida al entorno)*

■ Cambio de fase

Una **fase** es una región del espacio en la que una sustancia tiene unas mismas propiedades físicas y químicas. Una sustancia concreta puede presentarse en fase sólida, fase líquida o fase gaseosa. A estas fases se las denomina a veces los tres *estados* de la materia. El agua, por ejemplo, puede presentarse en las tres fases (o estados): líquida, hielo (sólida) y vapor (gaseosa). Una botella que contiene aceite y agua contiene dos fases, ambas en estado líquido.

Cuando se transfiere energía térmica a un sólido normalmente este se calienta. Para muchas sustancias sólidas, una vez alcanzan una determinada temperatura comienzan a **fundirse** (pasan de sólidas a líquidas), y mientras se están fundiendo, su temperatura no cambia (Figura 3.19). Esta temperatura se denomina **punto de fusión** de la sustancia y tiene un valor fijo a una determinada presión atmosférica (Tabla 3.3). La **fusión** es un ejemplo de **cambio de fase**.

De la misma manera, cuando un líquido se enfría, su temperatura se mantiene constante en el punto de solidificación mientras cambia de fase de líquido a sólido (Figura 3.20). Este proceso se denomina solidificación o **congelación**. Este último término puede resultar confuso, ya que «sugiere» que el proceso de solidificación tiene lugar a una temperatura baja, pero esto no es necesariamente cierto (a menos que nos refiramos al agua que se está convirtiendo en hielo, por ejemplo).

Los cambios de fase del agua son tan habituales en nuestra vida diaria que tendemos a pensar que son ejemplos obvios pero, por descontado, muchas otras sustancias pueden fundirse y congelarse. Por ejemplo, el hierro fundido «se congela» a 1538 °C.



Figura 3.20 *La temperatura cambia cuando un líquido se enfría y se congela (solidifica)*

(En las gráficas de las Figuras 3.19 y 3.20 el *tiempo* aparece representado en el eje horizontal, pero la forma de la gráfica sería la misma si se reemplazara el tiempo por la *energía transferida* [suponiendo que la tasa de calentamiento o de enfriamiento, respectivamente, sea constante]).

También se produce un cambio de fase cuando un líquido se convierte en gas o cuando un gas se convierte en líquido. El cambio de fase de gas a líquido puede tener lugar mediante ebullición o evaporación, pero generalmente este proceso se denomina **vaporización**. El cambio de gas a líquido se denomina **condensación**. La temperatura a la que se produce la ebullición se denomina **punto de ebullición** de la sustancia, y tiene un valor fijo para una determinada presión atmosférica (véase Tabla 3.3). Los puntos de ebullición pueden variar de forma significativa según las distintas presiones atmosféricas del entorno.

La representación gráfica del cambio de temperatura de un líquido que está siendo calentado hasta su ebullición tiene una forma análoga a la de la fusión de un sólido (Figura 3.19), mientras que la representación gráfica de un gas que está siendo enfriado tiene una forma análoga a la de un líquido congelándose (Figura 3.20).

Tanto para fundir un sólido como para vaporizar un líquido hace falta transferir energía térmica. Sin embargo, como ya hemos visto, la fusión y la vaporización se producen a temperatura constante, de manera que la energía suministrada debe invertirse en vencer las fuerzas intermoleculares e incrementar las separaciones moleculares. En el caso de la fusión se vencen algunas de estas fuerzas, pero en el caso de la vaporización se vencen *todas ellas*.

Cuando un líquido se congela (se solidifica) se emite la misma cantidad de energía por kilogramo que se necesita para fundirlo (sin cambio de temperatura). Análogamente, la vaporización y la condensación llevan asociadas cantidades iguales de energía transferida.

En la Figura 3.21 se representan los cuatro cambios de fase principales. En la Tabla 3.3 se enumeran los puntos de fusión y de ebullición de algunas sustancias comunes.

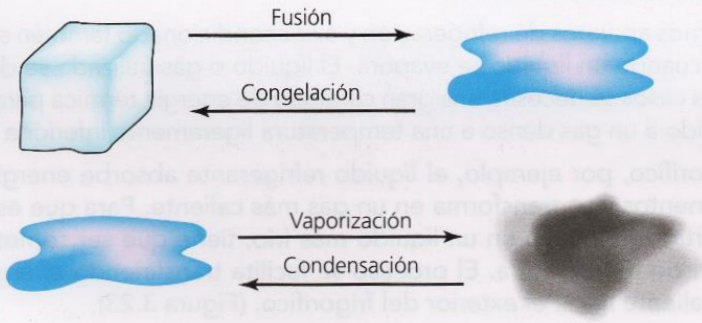


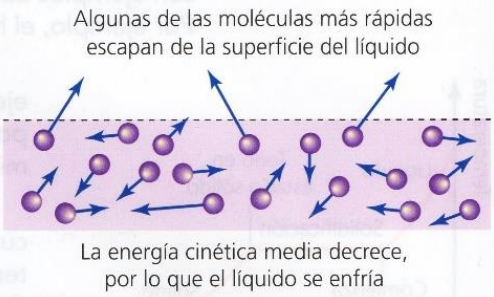
Figura 3.21 *Cambios de fase*

Tabla 3.3 *Puntos de fusión y de ebullición de algunas sustancias (a presión atmosférica normal)*

Sustancia	Punto de fusión		Punto de ebullición	
	°C	K	°C	K
agua	0	273	100	373
mercurio	–39	234	357	630
alcohol (etanol)	–117	156	78	351
oxígeno	–219	54	–183	90
cobre	1083	1356	2580	2853
hierro	1538	1811	2750	3023

Evaporación y ebullición

Las moléculas de un líquido poseen distintos valores de energía cinética que se transfieren unas a otras de forma continua. Esto significa que siempre hay algunas moléculas cerca de la superficie que poseen suficiente energía para vencer las fuerzas de atracción que mantienen unidas a las moléculas del líquido.



■ **Figura 3.22** *Las moléculas salen de la superficie durante la evaporación*

Estas moléculas pueden escapar de la superficie del líquido, y a este efecto macroscópico se le denomina **evaporación**. La pérdida de las moléculas más energéticas tiene como consecuencia que la energía cinética media de las moléculas que permanecen en el líquido decrece (hasta que entra energía térmica procedente del entorno). Este efecto microscópico explica el descenso macroscópico de la temperatura (enfriamiento) que siempre acompaña a la evaporación de un líquido.

La evaporación se produce únicamente a partir de la superficie de un líquido y puede darse a cualquier temperatura, aunque la tasa de evaporación aumenta de forma significativa cuando aumenta la temperatura (entre los puntos de fusión y de ebullición). La **ebullición** tiene lugar a una temperatura determinada, la temperatura a la que las moléculas tienen suficiente energía cinética para formar burbujas en el interior del líquido.

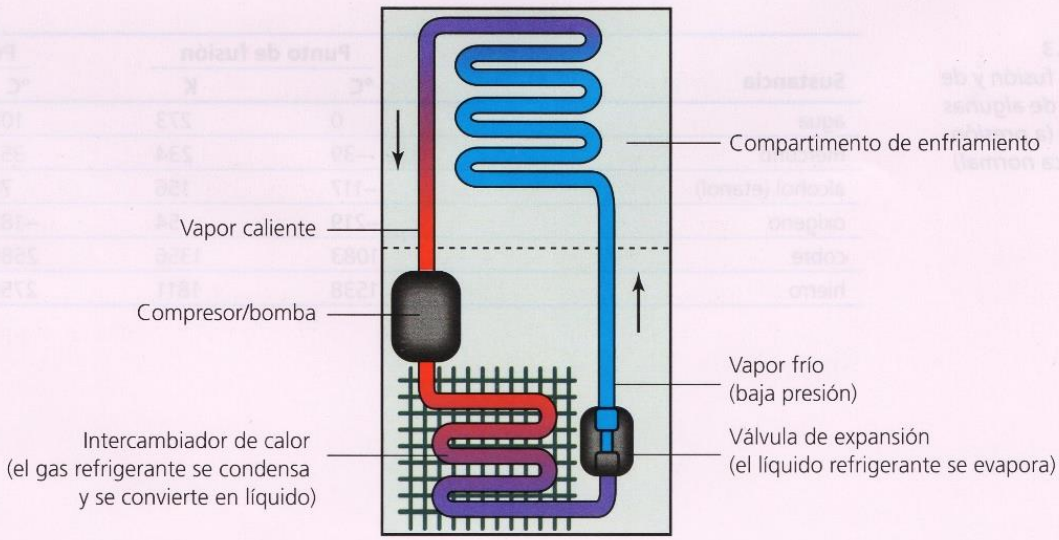
Aplicaciones

Evaporación, enfriamiento y refrigeración

El efecto de enfriamiento producido por la evaporación del agua ha sido utilizado durante miles de años para mantener frescas tanto las viviendas como sus habitantes. Por ejemplo, en Asia central, las torres abiertas de las construcciones favorecían el flujo de aire sobre depósitos abiertos de agua, incrementándose de este modo la tasa de evaporación y la transferencia de energía térmica hacia la parte superior de la torre mediante *corrientes de convección*. El flujo de aire alrededor de las personas en los edificios favorece asimismo el proceso de enfriamiento natural del cuerpo humano mediante el sudor.

Los modernos aparatos de refrigeración y aire acondicionado también se basan en el enfriamiento producido cuando un líquido se evapora. El líquido o gas utilizado se denomina *refrigerante*. En el mejor de los casos se necesita una gran cantidad de energía térmica para que el refrigerante pase de ser un líquido a un gas denso a una temperatura ligeramente inferior a la deseada.

En un frigorífico, por ejemplo, el líquido refrigerante absorbe energía térmica del compartimento de alimentos y se transforma en un gas más caliente. Para que este gas pueda ser reutilizado y convertido de nuevo en un líquido más frío, tiene que ser sometido a una compresión y una reducción de temperatura. El proceso se facilita transfiriendo energía térmica desde el gas refrigerante caliente hacia el exterior del frigorífico. (Figura 3.23).



■ **Figura 3.23** *Diagrama esquemático de un frigorífico*

Además de poseer las propiedades térmicas adecuadas, un refrigerante no debe ser tóxico ni perjudicial para el medio ambiente. El motivo es que, al cabo de un determinado periodo de tiempo, pueden producirse fugas de refrigerante hacia el medio ambiente. En la década de 1980 se descubrió que los refrigerantes más ampliamente utilizados (los CFC) eran perjudiciales para el medio ambiente (para la capa de ozono en particular), de modo que en muchos países se recomendó su no utilización e incluso llegó a prohibirse. Más recientemente la preocupación se ha focalizado en el efecto de los refrigerantes sobre el calentamiento global. Se ha investigado exhaustivamente la producción de diversos refrigerantes sintéticos con la combinación apropiada de propiedades físicas y químicas.

1 Dibuja esquemáticamente una construcción de la antigua Asia central en la que aparezcan la torre, el depósito de agua y las corrientes de convección.

2 El agua es barata, no es tóxica ni para los seres humanos ni para el medio ambiente y requiere una gran cantidad de energía para evaporarse. ¿Por qué no se usa entonces de forma generalizada como refrigerante en los aparatos de aire acondicionado?

3 Discute razonadamente si una fuente situada en la sala de estar de la vivienda contribuye o no a mantenernos frescos en un día de mucho calor.

4 Como se explicó anteriormente, hay que quitar energía térmica del refrigerante durante su ciclo. Sugiere un sistema para hacerlo.

Calor latente específico

Consideremos las transferencias de energía asociadas a los cambios de fase. Como ejemplo, en la Figura 3.24 se representan los cambios de temperatura que pueden tener lugar cuando una cierta cantidad de hielo picado se calienta *de forma continua* (primero para convertirlo en agua y después en vapor cuando el agua hierve). Aparecen dos mesetas en el gráfico. La primera, correspondiente a 0 °C (punto de fusión del agua), muestra la utilización de la entrada de energía adicional procedente del calentador para vencer algunas fuerzas intermoleculares del hielo. La temperatura no comienza a aumentar hasta que la totalidad del agua está en fase líquida. La segunda meseta corresponde a la temperatura de 100 °C, el punto de ebullición del agua. En este caso la energía suministrada se utiliza para liberar a todas las moléculas de las fuerzas intermoleculares.

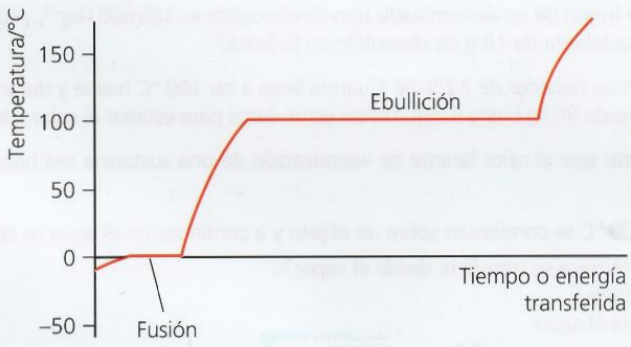


Figura 3.24
Representación gráfica de la temperatura en función del tiempo para el calentamiento de hielo picado

La energía térmica asociada a los cambios en las energías potenciales durante un cambio de fase cualquiera se denomina **calor latente** («latente» significa «escondido»). Durante la fusión o la ebullición debe transferirse calor latente a la sustancia. Durante la condensación o la congelación, el calor latente es transferido *desde* la sustancia.

El calor latente asociado a la fusión o a la congelación se denomina **calor latente de fusión**, L_f. El calor latente asociado a la ebullición o a la condensación se denomina **calor latente de vaporización**, L_v.

El **calor específico latente** de una sustancia, L, es la cantidad de energía transferida cuando 1 kilogramo de la sustancia cambia de fase a *temperatura constante*. (Las unidades son $J\,kg^{-1}$.)

Es decir:

$$\text{calor específico latente, } L = \frac{\text{energía térmica transferida}}{\text{masa}} = \frac{Q}{m}$$

lo que se escribe de forma habitual como:

$$Q = mL$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Por ejemplo, el calor latente específico de fusión del plomo es $2{,}45 \times 10^4\,J\,kg^{-1}$ y su punto de fusión es 327 °C. Esto significa que se necesitan $2{,}45 \times 10^4$ J para fundir 1 kg de plomo a una temperatura constante de 327 °C.



Los experimentos para la determinación del calor específico latente (se suele utilizar el agua como ejemplo práctico) presentan mucha similitud con los experimentos para la determinación de la capacidad calorífica específica. Para fundir o para hervir una sustancia habitualmente se utiliza un calentador eléctrico de capacidad conocida (o bien un líquido más caliente para fundir un sólido más frío). En la cuestión 31 se describe un experimento de este tipo.

Ejemplo resuelto

4 Los calores latentes de vaporización del agua y del etanol son, respectivamente, $2{,}27 \times 10^6\,J\,kg^{-1}$ y $8{,}55 \times 10^5\,J\,kg^{-1}$.

a ¿Cuál de ellos es más «fácil» de convertir en gas/hervir (a la misma presión)?

b ¿Cuánta energía térmica se necesita para convertir 50 g de etanol en un gas a su punto de ebullición de 78,3 °C?

a Es más «fácil» hervir etanol porque se necesita mucha menos energía para convertir cada kilogramo en gas.

b $Q = mL$

$Q = 0{,}050 \times (8{,}55 \times 10^5)$

$Q = 4{,}3 \times 10^4$ J

28 Si el calor latente de fusión de un determinado tipo de chocolate es $160\,000\,J\,kg^{-1}$, ¿cuánta energía térmica te quitan cuando se funde una tableta de 10 g de chocolate en tu boca?

29 Se calienta agua con un hervidor de 2 250 W. Cuando llega a los 100 °C hierve y durante los siguientes 180 s la masa de agua se reduce desde 987 g hasta 829 g. Utiliza estos datos para estimar el calor latente de vaporización del agua.

30 ¿Por qué cabe esperar que el calor latente de vaporización de una sustancia sea habitualmente mayor que el calor latente de fusión?

31 0,53 g de vapor a 100 °C se condensan sobre un objeto y a continuación el agua se enfría rápidamente hasta 35 °C.

a ¿Cuánta energía térmica se transfiere desde el vapor?:

i cuando se condensa

ii cuando se enfría el agua

b ¿Por qué una quemadura producida por vapor es mucho más peligrosa que una producida por agua a la misma temperatura (100 °C)? Sugiere una respuesta.

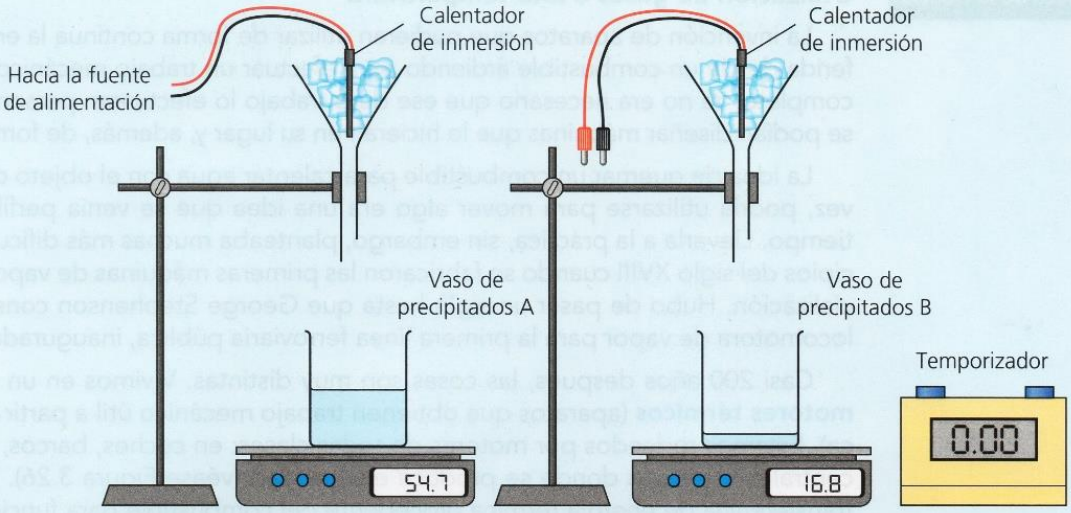
32 En el experimento que se muestra en la Figura 3.25, se colocan dos calentadores por inmersión de 50 W en dos embudos distintos. El calentador situado sobre el vaso de precipitados A se conecta a la red, pero el que está sobre el vaso de precipitados B se mantiene desconectado. Al cabo de 5 minutos se detecta que la masa de hielo fundido en el vaso de precipitación A es de 54,7 g, mientras que la masa correspondiente al vaso B es de 16,8 g.

a ¿Por qué motivo se coloca el hielo en dos embudos distintos?

b Utiliza los datos anteriores para estimar el calor latente de fusión del hielo.

c Sugiere un motivo por el que este experimento no proporciona un resultado exacto.

d Describe un posible cambio en el experimento que mejore su exactitud.



■ **Figura 3.25** *Experimento para la determinación del calor latente de fusión del hielo*

33 Se colocan 120 g de agua a 23,5 °C en una bandeja de plástico para hacer cubitos de hielo. Si la bandeja ya está a 0 °C, calcula cuánta energía térmica hay que quitarle al agua para convertirla en hielo a 0 °C. (El calor latente de fusión del agua es $3{,}35 \times 10^5\,J\,kg^{-1}$).

34 Las nubes están formadas por gotas de agua condensada que a veces se congelan, convirtiéndose en partículas de hielo. Supongamos que una nube tiene una masa de 240 000 kg, ¿cuánta energía térmica emitiría si la totalidad de la nube se convirtiera en hielo a 0 °C?

35 Una determinada cantidad de agua y un recipiente de cristal se encuentran a una temperatura de 23 °C y poseen una capacidad térmica combinada de $1\,500\,J\,K^{-1}$. Si se introduce en el agua un cubito de hielo de 48 g a –8,5 °C y se remueve hasta que se haya fundido el hielo, ¿cuál será la temperatura final? (La capacidad calorífica específica del hielo es $2\,100\,J\,kg^{-1}\,K^{-1}$. El calor latente de fusión del agua es $3{,}35 \times 10^5\,J\,kg^{-1}$).

3.2 Modelización de un gas

Las propiedades de los gases ideales permiten a los científicos establecer predicciones sobre el comportamiento de los gases reales

La **termodinámica** es una parte de la física que estudia las transferencias de energía térmica para la realización de un trabajo útil. Normalmente estos procesos están relacionados con gases a altas temperaturas. Para comprender los conceptos de la termodinámica es necesario tener un buen conocimiento de algunos de los conceptos científicos más básicos, como el comportamiento de las moléculas, la energía, la temperatura y la presión. Estos conceptos se utilizan en todas las disciplinas científicas.

■ Modelo cinético de un gas ideal

Comenzaremos nuestro estudio introductorio de la termodinámica a partir de un modelo simplificado que explique cómo se mueven las moléculas de un gas.

De las tres fases de la materia, la fase gaseosa es la más fácil de estudiar, porque normalmente podemos asumir que los movimientos de las moléculas de un gas son aleatorios e independientes entre sí. El comportamiento microscópico aleatorio de miles de millones de moléculas individuales, tiene como resultado un comportamiento macroscópico de los gases totalmente predecible y mucho más fácil de entender que las interacciones moleculares en el caso de los sólidos y los líquidos, mucho más complejas.

Podemos comenzar estableciendo algunos supuestos que permiten simplificar el comportamiento de las moléculas de un gas. A esta teoría se la denomina **modelo cinético de un gas ideal**. El término «cinético» se utiliza porque la teoría se aplica a moléculas *en movimiento*. Este modelo se puede utilizar, por tanto, para explicar la presión, la temperatura y el comportamiento macroscópico de los gases reales. Hay que tener en cuenta ya desde un buen principio que este modelo teórico describe de manera adecuada las propiedades de los gases reales en la mayoría de circunstancias, aunque no en todas.

Naturaleza de la ciencia

Utilización de gases a alta temperatura

La invención de aparatos que pudieran utilizar de forma continua la energía térmica (calor) transferida desde un combustible ardiendo para efectuar un trabajo mecánico útil cambió el mundo por completo. Ya no era necesario que ese duro trabajo lo efectuaran personas o animales, puesto que se podían diseñar máquinas que lo hicieran en su lugar y, además, de forma mucho más rápida.

La idea de quemar un combustible para calentar agua con el objeto de obtener vapor que, a su vez, podría utilizarse para mover algo era una idea que se venía perfilando desde hacía mucho tiempo. Llevarla a la práctica, sin embargo, planteaba muchas más dificultades y no fue hasta principios del siglo XVIII cuando se fabricaron las primeras máquinas de vapor para su posterior comercialización. Hubo de pasar un siglo hasta que George Stephenson construyera su *Locomotion*, la locomotora de vapor para la primera línea ferroviaria pública, inaugurada en Reino Unido en 1825.

Casi 200 años después, las cosas son muy distintas. Vivimos en un mundo dominado por los **motores térmicos** (aparatos que obtienen trabajo mecánico útil a partir del flujo de energía térmica). Estamos rodeados por motores de todas clases: en coches, barcos, trenes, aviones, fábricas y centrales eléctricas donde se produce electricidad (véase Figura 3.26). Todos ellos requieren una transferencia de energía térmica procedente del combustible para funcionar. Es difícil no exagerar la importancia de estos aparatos en la vida moderna, ya que sin ellos nuestras vidas serían muy distintas. Por otro lado, también somos muy conscientes de los problemas asociados al uso de los motores térmicos: limitación de los recursos de combustibles de origen fósil, aparatos ineficientes, contaminación y calentamiento global.



Figura 3.26 *Utilización de gases a alta temperatura en motores térmicos*

Supuestos del modelo cinético para un gas ideal

El modelo microscópico de un gas consiste en un gran número de moléculas que se mueven aleatoriamente. Podemos imaginarlas como las «moléculas en una caja», como se representa en la Figura 3.27. Las flechas de diferentes longitudes representan las velocidades aleatorias. Existen muchas simulaciones por ordenador del comportamiento de un gas en las que se representa el movimiento de las partículas durante un periodo de tiempo. Es muy recomendable acceder a una de estas simulaciones.

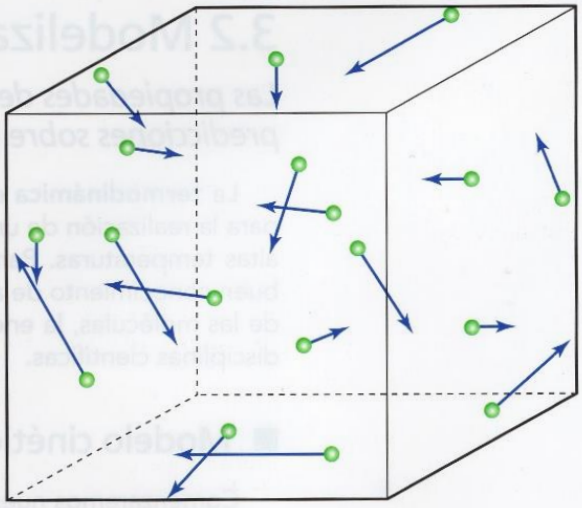


Figura 3.27 *Moléculas de gas moviéndose aleatoriamente en el interior de un recipiente*

Para simplificar la teoría se admiten los supuestos siguientes, de manera que el gas puede describirse como «ideal»:

- El gas contiene *un número muy elevado de moléculas idénticas.*
- El *volumen de las moléculas es despreciable* en comparación con el volumen total ocupado por el gas.
- Las moléculas *se desplazan en direcciones completamente aleatorias* y a velocidades muy variables.
- *No hay fuerzas de interacción entre las moléculas, excepto cuando colisionan.* Como consecuencia, las moléculas no tienen energía potencial (eléctrica). Bajo este supuesto, asumimos que cualquier cambio en la energía interna de un gas ideal ocasiona únicamente un cambio en la energía cinética aleatoria.
- *Todas las colisiones son elásticas*; es decir, la energía cinética total de las moléculas permanece constante a la misma temperatura. Esto último significa que no hay transferencia de energía desde el gas a su entorno y que la velocidad aleatoria media de sus moléculas no decrece. ¡Si no fuera así, todos los gases se enfriarían y sus moléculas se precipitarían al fondo de los recipientes y se condensarían, convirtiéndose en líquidos!

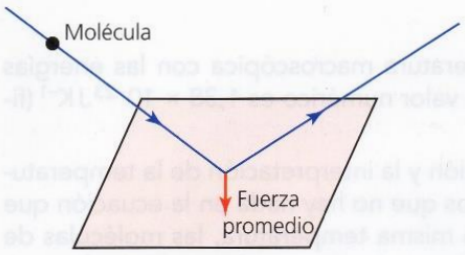


Figura 3.28
Cada colisión molecular con una pared ocasiona una diminuta fuerza sobre esta

Utilización de la teoría cinética de un gas ideal para explicar la presión de un gas

Cuando una molécula impacta (colisiona) con la pared de un recipiente, ejerce una fuerza sobre sus paredes (Figura 3.28).

Podemos calcular la intensidad de la fuerza conociendo la masa y el cambio en el momento de la molécula, además de la duración del impacto (véase Capítulo 2). Cada una de las colisiones puede dar lugar a una fuerza de distinta intensidad, de modo que no es realista pretender calcular todas y cada una de las fuerzas que las moléculas individuales ejercen sobre las paredes. No obstante, dado que los movimientos de las moléculas son aleatorios y que existe un número extraordinariamente elevado de moléculas, la fuerza total producida por multitud de colisiones moleculares sobre una unidad de superficie del recipiente es completamente predecible y normalmente será constante en todas las zonas del recipiente. A esta fuerza por unidad de superficie se la denomina **presión** del gas. Para representarla se utilizan indistintamente los símbolos P y p.

Las colisiones entre las moléculas (colisiones intermoleculares) tienen lugar constantemente, pero su consecuencia es simplemente un cambio aleatorio en las velocidades moleculares y no tienen efecto global sobre la presión u otras propiedades macroscópicas del gas.

Presión

El efecto de una fuerza suele depender del área de la superficie sobre la que actúa. Por ejemplo, cuando el peso de un sólido presiona sobre una determinada superficie, las consecuencias normalmente dependen del área afectada, así como de la intensidad de la fuerza.

La presión se define como fuerza por unidad de área:

$$p = \frac{F}{A}$$

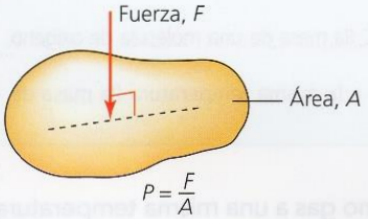


Figura 3.29
Definición de la presión

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*. La unidad del SI para la presión es el pascal Pa. $1\,\text{Pa} = 1\,\text{N m}^{-2}$.

Observemos que la fuerza que se utiliza para calcular la presión es perpendicular a la superficie, tal como se muestra en la Figura 3.29. Es decir, se trata de una fuerza **normal**.

La presión que se produce en un gas, debida a las colisiones moleculares aleatorias, actúa de forma equivalente en todas las direcciones y tiene un valor habitual del orden de magnitud de 10 N sobre cada centímetro cuadrado. En las unidades del SI, la presión habitual del aire que nos rodea (**presión atmosférica**) es $1{,}0 \times 10^5$ Pa a nivel del mar. La presión atmosférica actúa hacia arriba y hacia los laterales, además de hacia abajo.

Utilización de la teoría cinética de los gases ideales para explicar la temperatura de un gas

Al principio de este capítulo, explicamos la temperatura como una manera de determinar la dirección de la transferencia de energía térmica. Ahora podemos interpretar la temperatura de una manera más profunda: en términos de energías moleculares. Cuando calentamos un gas, la velocidad media de sus moléculas aumenta. La energía térmica transferida hacia el gas incrementa la energía cinética aleatoria de las moléculas.

Cuando una sustancia se enfría, sus moléculas se mueven más lentamente. Al final, casi todo el movimiento molecular se detiene y no es posible alcanzar una temperatura más baja. Los experimentos con gases predicen que esto último ocurre a −273,15 °C, una temperatura que, como vimos anteriormente, se denomina *cero absoluto*.

La **temperatura absoluta** (T) de un gas ideal (en kelvin) es una medida de la energía cinética de traslación aleatoria media de sus moléculas ($\bar{E}_C$).

La barra sobre la E indica que se está utilizando un valor promedio.

Esta importante relación puede expresarse matemáticamente como:

$$\bar{E}_C = \frac{3}{2} k_B T$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

k_B es una constante importante que relaciona la temperatura macroscópica con las energías microscópicas. Se denomina **constante de Boltzmann** y su valor numérico es $1{,}38 \times 10^{-23}\,J\,K^{-1}$ (figura en el *Apéndice de datos de Física*).

Aunque estamos hablando de gases *ideales*, esta ecuación y la interpretación de la temperatura pueden aplicarse también a los gases reales. Observemos que no hay nada en la ecuación que se aplique a un gas en particular. En otras palabras, a una misma temperatura, las moléculas de *todos* los gases tienen la misma energía cinética de *traslación* media. Si consideramos que la energía cinética se expresa mediante $E_c = \frac{1}{2}mv^2$, podemos ver que las moléculas de los distintos gases deben tener distintas velocidades medias a una misma temperatura: las moléculas más masivas se mueven más despacio.

k_B puede ser interpretada en términos de la capacidad calorífica específica de un gas: corresponde a $\frac{2}{3}$ de la cantidad de energía media que debe suministrarse por molécula para incrementar en 1 K la temperatura de un gas ideal *monoatómico*. Debemos tener en cuenta, sin embargo, que se necesita más energía para cambiar la temperatura de los gases *moleculares* porque también se ven involucradas las energías cinéticas de rotación y de vibración.

36 La presión atmosférica normal es aproximadamente 1×10^5 Pa.
- **a** ¿Cuál es la fuerza total que actúa sobre un superficie de 1 mm^2?
- **b** Si un estudiante tuviera un cuerpo con una superficie total de 1,5 m^2, ¿cuál sería la fuerza total que actúa sobre su piel?
- **c** ¿Cómo es que no notamos una fuerza de tal magnitud?

37 ¿Por qué aumenta la presión debajo del agua a medida que un submarinista se sumerge a mayor profundidad?

38 **a** La presión bajo nuestros pies actúa en dirección hacia el suelo, pero la presión en un gas actúa en todas direcciones. Explica este fenómeno.
- **b** ¿En qué dirección o direcciones actúa la presión en un líquido?

39 **a** Calcula la energía cinética de traslación media de las moléculas del aire a 27 °C.
- **b** Calcula la temperatura (°C) a la que la energía cinética de traslación media de las moléculas de un gas es $1{,}0 \times 10^{-20}$ J.
- **c** Estima la energía cinética de traslación media de las partículas de la superficie del Sol. (Utiliza Internet para obtener los datos necesarios).

40 **a** Determina un valor para la velocidad media de las moléculas de oxígeno a 0 °C (la masa de una molécula de oxígeno es = $5{,}32 \times 10^{-26}$ kg).
- **b** Determina un valor para la velocidad media de las moléculas de nitrógeno a la misma temperatura (la masa de una molécula de nitrógeno es = $4{,}65 \times 10^{-26}$ kg).

Es importante destacar que las moléculas individuales de un mismo gas a una misma temperatura se mueven siguiendo un amplio intervalo de velocidades y energías cinéticas. Cualquier valor calculado es solamente un promedio. La temperatura es un concepto que solo puede aplicarse a un conjunto muy numeroso de moléculas, no a moléculas individuales. Es decir, la temperatura es un concepto macroscópico, aunque desde el punto de vista estadístico tiene una interpretación microscópica.

Perspectivas adicionales

Teoría cinética y distribución de velocidades moleculares

En la Figura 3.30 se representa el intervalo de velocidades moleculares y su distribución para un gas típico, así como los cambios que se producen en estos valores a medida que aumenta la temperatura. Esta distribución se conoce con el nombre de *distribución de Maxwell-Boltzmann*.

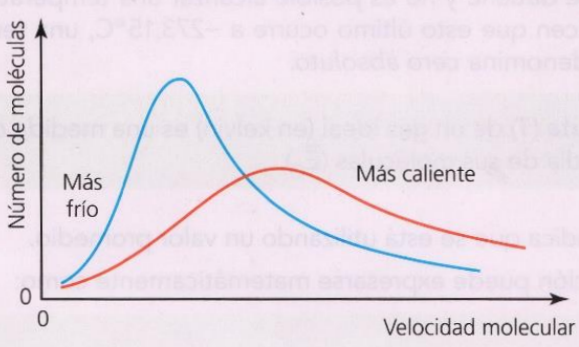


Figura 3.30 *Distribuciones típicas de las velocidades moleculares en un gas*

Cabe destacar que no hay moléculas con velocidad cero y muy pocas con velocidades elevadas. Las velocidades y direcciones moleculares cambian continuamente a consecuencia de las colisiones intermoleculares. Como ya hemos visto, mayor temperatura significa mayor energía cinética y, por tanto, mayor velocidad molecular. El intervalo de velocidades también se amplía y el máximo desciende, manteniéndose la misma área bajo la gráfica, ya que esta área representa el número de moléculas, que es constante.

La Figura 3.31 ilustra los intervalos de velocidades moleculares para distintos gases a la misma temperatura. Puede verse que, como explicamos anteriormente, a la misma temperatura las moléculas de menos masa tienen velocidades más elevadas que las moléculas de más masa.

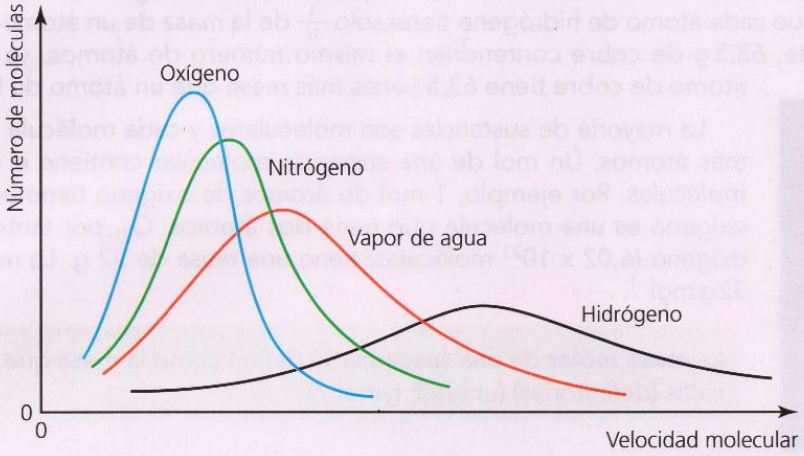


Figura 3.31
Distribución de las velocidades moleculares de distintos gases a la misma temperatura

1 **a** Explica por qué el hidrógeno en forma gaseosa *difunde* más rápidamente que otros gases a la misma temperatura.

b Sugiere el nombre de un gas que se difunda muy lentamente.

c Si colocamos un cilindro con gas nitrógeno a 20 °C en un avión en un aeropuerto y después el avión viaja a 500 ms^{-1}, ¿qué les ocurrirá a la velocidad media y a la temperatura de las moléculas de nitrógeno? Razona tu respuesta.

d Razona por qué la voz de una persona suena con un tono inusualmente agudo cuando acaba de inhalar una pequeña cantidad de gas helio procedente de un globo.

e Explica por qué sería razonable asumir que los volúmenes de los cuatro gases representados en la Figura 3.31 son aproximadamente iguales.

Mol, masa molar y número de Avogadro

Si queremos efectuar cálculos relativos a la masa, la velocidad y la energía cinética de las moléculas de un gas, necesitamos comprender la relación entre la medida macroscópica de la masa y el número microscópico de moléculas.

La *cantidad* de una sustancia (símbolo *n*) es una medida del número de partículas que contiene y se mide en moles:

Un **mol** de una sustancia es la cantidad de sustancia que contiene tantas partículas (definitorias de la sustancia) como átomos contienen exactamente 12 g de carbono-12.

El número de partículas que hay en un mol se denomina **número de Avogadro**, N_A.

El valor del número de Avogadro figura en el *Apéndice de datos de Física*: $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}\,mol^{-1}$ (con tres cifras significativas). Así, para una muestra que contenga *N* moléculas, el número de moles viene dado por:

$$n = \frac{N}{N_A}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

El valor del número de Avogadro puede determinarse experimentalmente a partir del estudio de la transmisión de las corrientes eléctricas (véase Capítulo 5) por parte de los iones en movimiento durante la **electrolisis** y de medidas precisas de los cambios de masa asociados.

Por definición, 1 mol de átomos de carbono-12 tiene una masa de exactamente 12 g y contiene $6{,}02 \times 10^{23}$ átomos. El mismo número de átomos de hidrógeno tendría una masa de solo 1,0 g, porque cada átomo de hidrógeno tiene solo $\frac{1}{12}$ de la masa de un átomo de carbono-12. Análogamente, 63,5 g de cobre contendrían el mismo número de átomos, ya que, en promedio, cada átomo de cobre tiene 63,5 veces más masa que un átomo de hidrógeno.



Figura 3.32 *Un mol de agua (en forma de hielo), azúcar, cobre y aluminio*

La mayoría de sustancias son moleculares y cada molécula está compuesta de dos o más átomos. Un mol de una sustancia molecular contiene el número de Avogadro de *moléculas*. Por ejemplo, 1 mol de *átomos* de oxígeno tiene una masa de 16 g, pero el oxígeno es una molécula que tiene dos átomos, O_2, por tanto, 1 mol de *moléculas* de oxígeno ($6{,}02 \times 10^{23}$ moléculas) tiene una masa de 32 g. La masa molar del oxígeno es $32\,g\,mol^{-1}$.

La **masa molar** de una sustancia se define como la masa que contiene 1 mol de partículas (definitorias) (unidad: $g\,mol^{-1}$).

En la Tabla 3.4 se enumeran las masas molares de algunas sustancias corrientes, así como el número de partículas asociadas. En la Figura 3.32 se representa el aspecto que tendría 1 mol de distintas sustancias.

Tabla 3.4
Masas molares

Sustancia	Masa molar/$g\,mol^{-1}$	Partículas
aluminio	27,0	$6{,}02 \times 10^{23}$ átomos de aluminio
cobre	63,5	$6{,}02 \times 10^{23}$ átomos de cobre
oro	197	$6{,}02 \times 10^{23}$ átomos de oro
hidrógeno	2,02	$12{,}04 \times 10^{23}$ átomos de oxígeno combinados para formar $6{,}02 \times 10^{23}$ moléculas
oxígeno	32,0	$12{,}04 \times 10^{23}$ átomos de oxígeno combinados para formar $6{,}02 \times 10^{23}$ moléculas
agua	18,0	$6{,}02 \times 10^{23}$ átomos de oxígeno combinados con $12{,}04 \times 10^{23}$ átomos de hidrógeno para formar $6{,}02 \times 10^{23}$ moléculas de agua
aire (a presión y temperatura normales)	≈29	$6{,}02 \times 10^{23}$ moléculas de una mezcla de gases
azúcar (sacarosa)	342	$6{,}02 \times 10^{23}$ moléculas de gran tamaño

Ejemplo resuelto

5 La masa molar del agua es 18 $g\,mol^{-1}$. ¿Cuántas moléculas hay en 1 kg de agua?

número de moles (cantidad de agua) en 1 kg $= \frac{1000}{18} = 55{,}6$ moles

número de moléculas en 55,6 moles $= 55{,}6 \times (6{,}02 \times 10^{23}) = 3{,}34 \times 10^{25}$ moléculas

Para responder a las cuestiones siguientes es necesario utilizar datos de la Tabla 3.4.

41 **a** ¿Qué masa de aluminio contendrá exactamente 4 moles de átomos?
b ¿Qué masa de sacarosa contendrá $1{,}0 \times 10^{22}$ moléculas?
c ¿Cuántos moles hay en 2,00 kg de carbono?
d ¿Cuántas moléculas hay en 1,0 kg de dióxido de carbono (CO_2)?

42 Un anillo de oro tenía una masa de 12,3 g.
- **a** ¿Cuántos moles de átomos de oro contenía?
- **b** Cuando se pesa al cabo de 50 años, su masa ha decrecido hasta 12,2 g. ¿Cuántos átomos de oro se «han perdido» en promedio cada segundo durante este periodo de tiempo?

43 **a** Si la densidad del aire de un aula es $1{,}3\,kg\,m^{-3}$, ¿cuál es la masa total de gas de una habitación de dimensiones 2,5 m x 5,0 m x 10,0 m?
- **b** ¿Cuántos moles de aire hay aproximadamente en la habitación?
- **c** ¿Cuántas moléculas de aire hay aproximadamente en la habitación?

44 La densidad del aluminio es $2{,}7\,g\,cm^{-3}$.
- **a** ¿Cuál es el volumen de un mol de aluminio?
- **b** ¿Cuál es el volumen medio ocupado por un átomo de aluminio?
- **c** ¿Cuál es la separación aproximada de los átomos de aluminio?

45 ¿Qué masa de oxígeno contiene $2{,}7 \times 10^{24}$ moléculas?

Ecuación de estado de un gas ideal

Centremos ahora nuestra atención en las propiedades físicas a larga escala (*macroscópicas*) de un gas ideal: cantidad de sustancia expresada en número de moles, n, presión, p, volumen, V, y temperatura absoluta, T. En conjunto, estas cuatro propiedades describen completamente las características físicas de cualquier cantidad de cualquier gas.

Si asumimos las hipótesis de la teoría cinética de los gases ideales y las leyes de la mecánica (Capítulo 2), se puede demostrar que estas cuatro variables están relacionadas mediante la ecuación:

$$\frac{pV}{nT} = \text{constante}$$

El valor de la «constante» de esta ecuación es el mismo para *todos* los gases ideales. Esto es así porque, a una misma temperatura, las moléculas de todos los gases ideales tienen la misma energía cinética de traslación media: las moléculas de gas de mayor masa se desplazan más lentamente que las más ligeras. El resultado es que una cantidad equivalente de cualquier gas ideal a una misma temperatura ejerce la misma presión sobre un mismo volumen. No hay nada en esta ecuación que sirva para representar las propiedades de un gas en concreto.

La «constante» de esta ecuación se denomina **constante universal (molar) de los gases**. (Normalmente se denomina simplemente «*constante de los gases*»). Se representa mediante el símbolo R y su valor es $8{,}31\,J\,K^{-1}\,mol^{-1}$. Este valor figura en el *Apéndice de datos de Física*.

La ecuación anterior puede reescribirse de la forma siguiente:

$$pV = nRT$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

La ecuación anterior se conoce como **ecuación de estado de un gas ideal**. Esta importante ecuación define el comportamiento *macroscópico* de un gas ideal. Por ejemplo, la presión, el volumen o la temperatura de una cantidad conocida, n, de un gas ideal pueden calcularse mediante la ecuación de estado si las otras dos variables son conocidas. El significado *microscópico* de un gas ideal se discutió al principio de este capítulo. La ecuación también define el significado de la constante universal de los gases ($R = pV/nT$).

Atendiendo a sus unidades, puede interpretarse fácilmente la constante universal de los gases, R, como la cantidad de energía necesaria para incrementar la temperatura de 1 mol de un gas ideal en 1 K.

$$\text{la energía cinética total de traslación aleatoria total (= energía interna total) del conjunto de moléculas de 1 } \textit{mol} \text{ de un gas ideal} = \frac{3}{2}RT$$

Esta ecuación no aparece en el *Apéndice de datos de Física*.

Pero ya hemos visto que la energía cinética de traslación media de una única molécula de un gas ideal $= \frac{3}{2}k_B T$ y como 1 mol contiene N_A moléculas, podemos deducir que:

$$\text{la constante de Boltzman, } k_B = \frac{R}{N_A}$$

Esta ecuación *no* figura en el *Apéndice de datos de Física.*

Por tanto, la ecuación para la energía cinética de traslación media de las moléculas:

$$\overline{E}_C = \frac{3}{2}k_B T$$

puede escribirse también como:

$$\overline{E}_C = \frac{3}{2}\frac{R}{N_A}T$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física.*

Naturaleza de la ciencia

La colaboración efectiva suele ser necesaria para desarrollar una teoría

A diferencia de lo que ocurre con las leyes de Newton, por ejemplo, el modelo cinético de un gas ideal no suele atribuirse a un científico conocido en particular. El modelo cinético de un gas ideal no es una teoría propuesta por un único científico tras un descubrimiento o un momento de inspiración. Es el resultado de la colaboración y la combinación gradual de ideas de muchos científicos, algunos más destacados y otros menos, a lo largo de muchos años.

La investigación y el desarrollo científico moderno se suele caracterizar por la presencia de un equipo de trabajo cuyos miembros acostumbran a provenir de distintas especialidades, distintos métodos de trabajo y distintas perspectivas. La colaboración entre los miembros de un equipo favorece un ambiente científico productivo en el que pueden prosperar ideas nuevas y originales. Pero no siempre ha sido así. En el pasado, la investigación científica tendía a ser más individualista e incluso hermética.

Ejemplos resueltos

6 ¿Cuál es la presión de 23 moles de un gas que se comporta como un gas ideal y que está en un recipiente de 0,25 m^3 a 310 K?

$$p = \frac{nRT}{V}$$

$$p = \frac{23 \times 8{,}31 \times 310}{0{,}25}$$

$$p = 2{,}4 \times 10^5\ \text{Pa}$$

7 **a** Una masa determinada de un gas ideal tiene un volumen de 23,7 cm^3 a 301 K. Si su temperatura aumenta hasta 365 K manteniéndose la presión, ¿cuál será el nuevo volumen, V_2?

b Explica por qué ha aumentado el volumen.

a $\frac{V}{T} = \frac{nR}{p} = \text{constante}$

$$\frac{23{,}7}{301} = \frac{V_2}{365}$$

$$V_2 = 28{,}7\ \text{cm}^3$$

b El volumen ha aumentado porque la presión no ha cambiado. Las moléculas se mueven más rápido y colisionan con las paredes más a menudo (y con más fuerza) creando una presión más elevada, a menos que el volumen aumente.

8 Estima la energía cinética de traslación total del conjunto de moléculas de una habitación de tamaño medio.

volumen aproximado = $4 \times 4 \times 3 \approx 48\ \text{m}^3$

masa aproximada de aire = 48 × densidad del aire ($1{,}3\ \text{kg m}^{-3}$) = 62 kg

$$\text{número aproximado de moles} = \frac{\text{masa de aire}}{\text{masa molar media}} = \frac{62}{0{,}029} = 2\,100\ \text{moles}$$

$$\text{energía cinética aproximada} = \text{número de moles} \times E_C\ \text{mol}^{-1} = 2\,100 \times \frac{3}{2}RT$$

A una temperatura de 300 K (27 °C), este valor es:

$2\,100 \times 1{,}5 \times 8{,}31 \times 300 \approx 8 \times 10^6\ \text{J}$



Figura 3.33 *Oxígeno en forma gaseosa almacenado en cilindros metálicos resistentes*

Diferencias entre gases ideales y gases reales

Evidentemente, no es exactamente lo mismo un gas *real* que un gas *ideal*. Sin embargo, las diferencias entre ambos suelen ser, aunque no siempre, insignificantes, de modo que se acostumbra a suponer que la ecuación de estado de un gas ideal puede utilizarse para realizar cálculos para una muestra de un gas real. Los gases reales, no obstante, *no* se comportan como gases ideales (obedeciendo, por tanto, la ecuación de estado) cuando las fuerzas intermoleculares se hacen significativas porque las moléculas están muy juntas, o bien porque los tamaños moleculares ya no pueden considerarse despreciables en comparación con sus separaciones. Estas situaciones pueden tener lugar a presiones y densidades elevadas o a bajas temperaturas.

Cuando un gas se enfría, las moléculas se mueven cada vez más despacio y la presión disminuye (suponiendo que ni la masa ni el volumen cambien). A medida que desciende la temperatura, los gases reales se transforman en líquidos y después en sólidos, si la temperatura es tan baja que las moléculas no tienen suficiente energía cinética para vencer las fuerzas intermoleculares. Sin embargo, un gas ideal no puede licuarse.

Para almacenar o transportar gases suele ser necesario reducir su volumen mediante la utilización de altas presiones y/o transformándolos en líquidos (Figura 3.33). Los contenedores deben ser muy resistentes y deben manipularse con cuidado; bajo estas condiciones, no cabe esperar que los gases se comporten *idealmente*.

46 ¿Qué volumen de gas (en cm^3) contiene 0,780 moles de gas a 264 K a presión atmosférica normal ($1{,}00 \times 10^5$ Pa)?

47 ¿A qué temperatura (°C) se encuentran 0,46 moles de gas si la presión ejercida sobre un recipiente de 8520 cm^3 es $1{,}4 \times 10^5$ Pa?

48 ¿Qué cantidad aproximada de aire ejercería una presión de $2{,}60 \times 10^7$ Pa sobre un cilindro de 12 000 cm^3 utilizado como bombona de aire para buceo (Figura 3.34)?



Figura 3.34 *Ser buceador implica aprender sobre las variaciones de la presión de un gas bajo el agua (véase cuestión 48)*

49 **a** ¿Qué es la masa molar del oxígeno?
b ¿Qué volumen ocuparía 1,0 kg de oxígeno a 25 °C y $1{,}3 \times 10^5$ Pa?

50 ¿Qué presión se ejerce cuando se colocan 2,49 g de gas helio en un contenedor de 600 cm^3 a –30.5 °C?

51 **a** Un recipiente contiene 4060 cm^3 de un gas al doble de la presión atmosférica normal ($2{,}00 \times 10^5$ Pa). Si el volumen se reduce hasta 3240 cm^3 a la misma temperatura, ¿cuál será la nueva presión?
b Explica por qué ha aumentado la presión.

52 **a** Una determinada cantidad de helio en una botella ejerce una presión de $2{,}12 \times 10^6$ Pa a –234 °C. Si se aumenta la temperatura exactamente 100 °C, calcula el valor de la nueva presión (suponiendo que la botella no se expande).
b Explica por qué aumenta la presión.
c Explica por qué el uso de la ecuación de estado podría llevar a un resultado inexacto en este ejemplo.

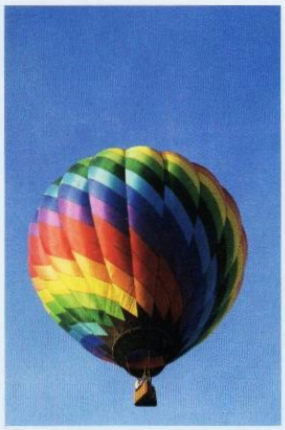


Figura 3.35 *Globo aerostático*

53 Un gas a 287 K tiene un volumen de 2,4 m^3 y una presión de $1{,}2 \times 10^5$ Pa. Cuando se comprime, la presión aumenta hasta $1{,}9 \times 10^5$ Pa y la temperatura aumenta 36 K. ¿Cuál será el nuevo volumen?

54 En el recipiente C hay 4 moles de gas. El recipiente D está a la misma temperatura pero contiene 3 moles de gas en el doble de volumen. ¿Cuál es el valor del cociente p_C/p_D?

55 El volumen de un gas se duplica, pero la presión debe mantenerse constante. ¿Cuál será la temperatura final (Celsius) si la temperatura original era 17 °C?

56 Explica cómo se puede controlar la altura de crucero de un globo aerostático como el que se muestra en la Figura 3.35.

Enlace con la teoría del conocimiento

Los modelos siempre presentan limitaciones

¿Cuándo es un modelo de una situación «ideal» lo «suficientemente bueno» como para considerarlo conocimiento?

No podemos utilizar la percepción humana (por ejemplo la vista) directamente para intentar comprender el comportamiento de las moléculas de un gas. Esta es la razón por la que necesitamos un «modelo». Pero, ¿podemos estar seguros en algún momento de que un modelo es una representación verdadera de la realidad si nunca podemos observar los sucesos de forma directa? ¿O bien siempre nos quedará alguna duda? Y, si el modelo funciona, ¿importa realmente si el modelo es o no una «verdadera» representación de algo que, de todos modos, no podemos observar?

¿Puede un modelo del sistema solar, por ejemplo, considerarse conocimiento de alto nivel, porque podemos observarlo directamente y registrar el movimiento de los planetas?

Investigación experimental del comportamiento macroscópico de los gases reales

Dado un recipiente sellado que contiene un gas en su interior, existen cuatro propiedades físicas macroscópicas del gas que podemos medir de forma relativamente sencilla: la masa, el volumen, la temperatura y la presión. *Para una masa fija de gas,* las otras tres propiedades están interrelacionadas; es decir, si una de ellas se modifica, al menos una de las dos restantes debe modificarse, e incluso las dos.

Perspectivas adicionales

Medida de la presión de un gas

Una pequeña *diferencia* en la presión de un gas puede medirse utilizando un simple tubo en forma de U que contiene un líquido, tal como se muestra en la Figura 3.36. El gas que procede de un recipiente situado a la izquierda (y que no se muestra) está a una presión más elevada que la presión atmosférica (entrada derecha del tubo en U). Este tubo, que forma parte de un aparato, se denomina *manómetro*.

La diferencia de presión, Δp, produce una diferencia en los niveles de líquido de ambas partes del tubo; la altura Δh es una medida de dicha diferencia de presión. Podría registrarse, por ejemplo, como 14,0 cm de agua. Si se utilizara mercurio en lugar de agua, Δh estaría en torno a 1 cm, ya que el mercurio es aproximadamente 14 veces más denso que el agua. Para convertir la diferencia de presión a pascales, se puede utilizar la fórmula $\Delta p = \Delta h \rho g$, donde ρ es la densidad del líquido que se introduce en el manómetro. (Esta ecuación puede obtenerse a partir de $p = F/A$, considerando el peso adicional del líquido en uno de los lados y el área de la sección transversal del tubo.)

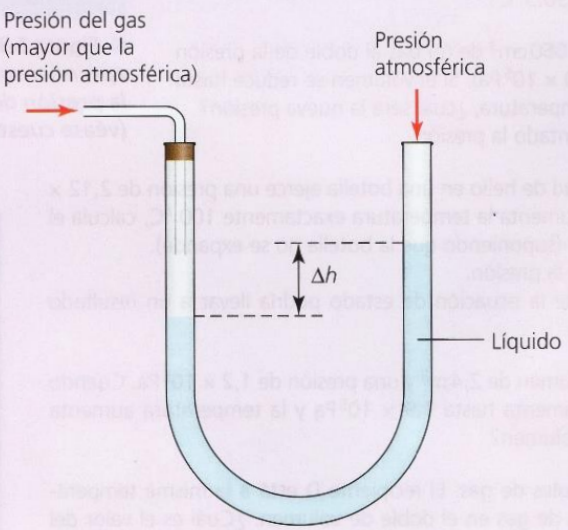


Figura 3.36
Manómetro simple

Para medir directamente la presión real del gas sobre el recipiente utilizando un manómetro (en lugar de medir la diferencia de presión) habría que extraer completamente el aire de la parte derecha (creando un *vacío*). La diferencia de altura Δh sería mucho mayor y se necesitaría un tubo muy largo, a menos que se utilizara mercurio.

El instrumento diseñado para medir la presión atmosférica se denomina *barómetro*. En general, los instrumentos diseñados para medir la presión de un gas se suelen denominar *manómetros*. Existen diversos diseños.

1 ¿Cuál es la presión que corresponde a 14 cm de agua expresada en pascales?

2 **a** Sugiere una longitud adecuada de un tramo de tubo lleno de mercurio para medir la presión atmosférica (alrededor de 1×10^5 Pa). Explica tu respuesta.

b ¿Por qué sería necesario que el tramo de tubo fuera resistente?

Las leyes de los gases

A partir de tres experimentos de física clásicos se demostró que *todos* los gases, bajo la mayoría de circunstancias, siguen los mismos patrones simples de comportamiento (se suelen llamar las tres **leyes de los gases**). Recomendamos a los estudiantes que utilicen modelos informáticos para investigar las propiedades físicas de los gases bajo un número mayor de circunstancias que las que se pueden tener en cuenta normalmente en un laboratorio académico.

Variación del volumen de un gas respecto a la presión: ley de Boyle

En la Figura 3.37 se muestran dos conjuntos de aparatos que podrían utilizarse para investigar la variación del volumen de un gas cuando se modifica la presión que actúa sobre una masa fijada. Cuando se utiliza una fuerza para cambiar el volumen de un gas, tiende a variar su temperatura, hecho que complica los resultados. Para minimizar este efecto indeseado, los cambios se deben hacer lentamente.

Los resultados experimentales habituales se representan en la Figura 3.38a. La línea que aparece en la gráfica se denomina isoterma («iso» significa «igual»; todos los puntos de una isoterma corresponden al gas a la misma temperatura).

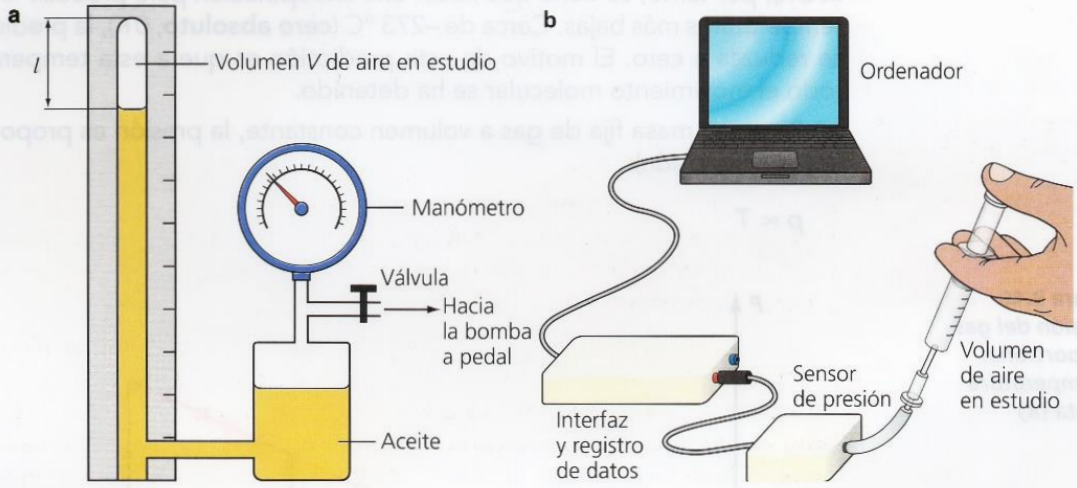


Figura 3.37
Dos métodos para investigar la ley de Boyle

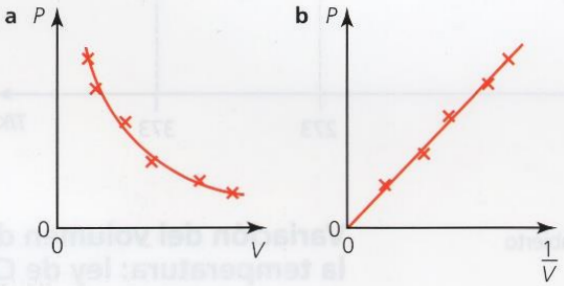


Figura 3.38
Dos gráficas que muestran que la presión del gas es inversamente proporcional al volumen

En la Figura 3.38b se representan los mismos datos de otro modo, con objeto de obtener una gráfica lineal que pase por el origen, confirmándose que, para una masa fija de gas a una temperatura constante, la presión es inversamente proporcional al volumen (*ley de Boyle*):

$$p \propto \frac{1}{V}$$

Variación de la presión de un gas respecto a la temperatura: ley de la presión

En la Figura 3.39 se muestran dos conjuntos de aparatos que podrían utilizarse para investigar la variación de la presión de un gas cuando se modifica la temperatura de una masa fija de gas a volumen constante.

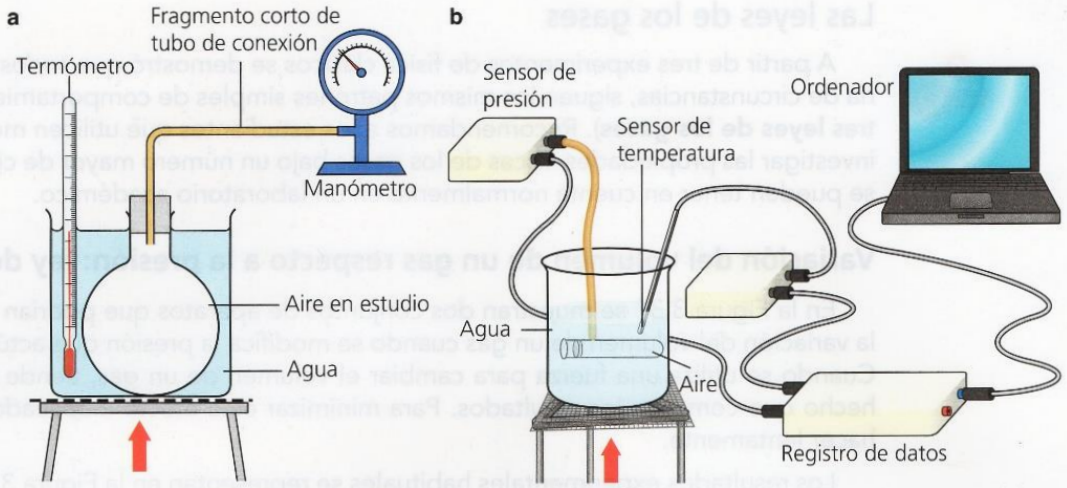


Figura 3.39
Dos conjuntos de aparatos que pueden utilizarse para investigar la ley de la presión

Los resultados experimentales habituales se representan en la Figura 3.40. Estos resultados se suelen obtener en el intervalo de temperaturas comprendido entre 0 °C y 100 °C (entre 273 K y 373 K), por tanto, se tiene que hacer una extrapolación para predecir los datos correspondientes a temperaturas más bajas. Cerca de –273 °C (**cero absoluto**, 0 K), la predicción para la presión es que se reduzca a cero. El motivo de esta predicción es que a esta temperatura de 0 K prácticamente todo el movimiento molecular se ha detenido.

Para una masa fija de gas a volumen constante, la presión es proporcional a la temperatura (K) (*ley de la presión*):

$$p \propto T$$

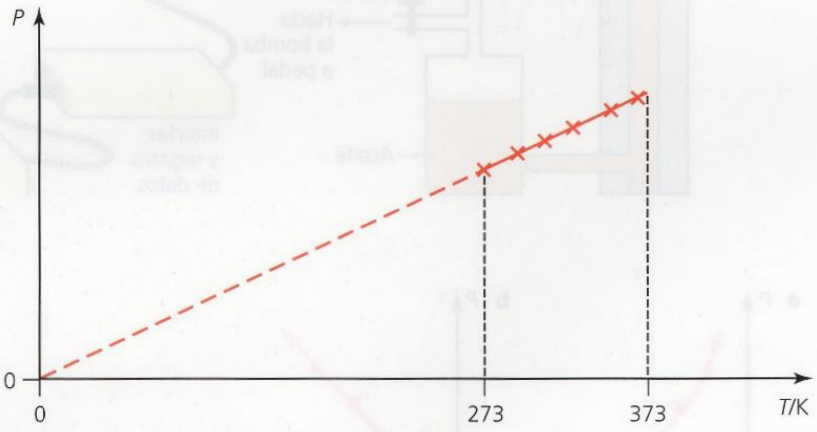


Figura 3.40
La presión del gas es proporcional a la temperatura absoluta (K)

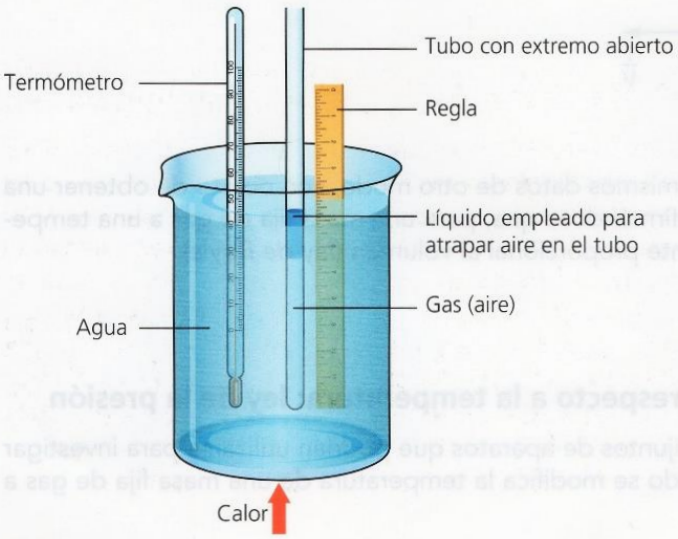


Figura 3.41
Aparato sencillo para investigar la ley de Charles

Variación del volumen de un gas respecto a la temperatura: ley de Charles

En la Figura 3.41 se muestra un aparato sencillo que podría utilizarse para investigar como varía el volumen de un gas cuando se modifica la temperatura de una masa fija de gas mantenida a presión constante. Cuando el agua se calienta, fluye energía térmica hacia el gas atrapado, que se expande (el líquido se desplaza), manteniéndose a presión constante porque el extremo abierto del tubo permanece a la presión atmosférica.

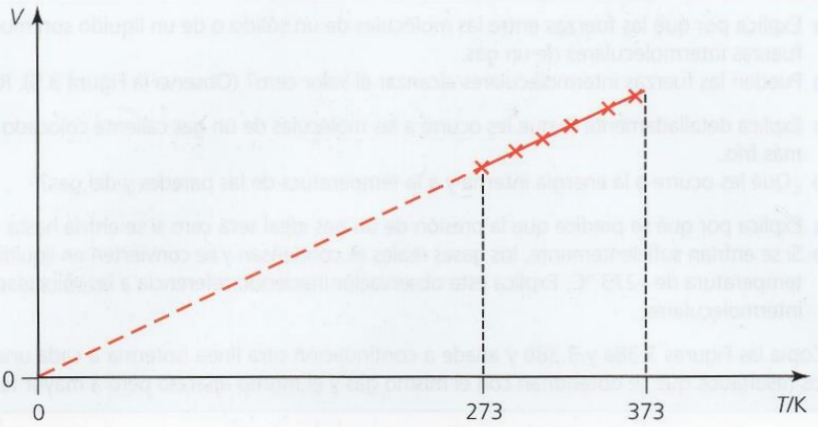


Figura 3.42
El volumen del gas es proporcional a la temperatura absoluta (K)

Los resultados experimentales habituales se representan en la Figura 3.42. Podemos predecir que el volumen se reduce a cerò cerca de –273 °C (cero absoluto, 0 K).

Para una masa fija de gas a presión constante, el volumen es proporcional a la temperatura (K) (*ley de Charles*):

$$V \propto T$$

Combinación de las leyes de los gases

Los resultados de los experimentos relativos a las tres leyes de los gases se pueden combinar de la forma siguiente:

$$pV \propto T$$

Otros experimentos más exhaustivos confirman que, bajo la mayoría de circunstancias, las propiedades físicas de los gases reales pueden describirse mediante la ecuación:

$$pV = nRT$$

Esta ecuación *empírica* (basada en resultados experimentales) es análoga a la *ecuación de estado teórica* que se discute en la página 131. En otras palabras, cuando se desarrolló la ecuación, se confirmaron los resultados experimentales que ya se habían obtenido.

Comprender cómo se producen los cambios de *estado* de un gas y cómo representarlos gráficamente es clave para el estudio de los motores térmicos (Opción B).

Utilización de la energía cinética para explicar las leyes de los gases cualitativamente

- *Ley de Boyle* – Cuando el volumen de un gas disminuye, las moléculas impactan sobre las paredes con más frecuencia porque tienen menos distancia que recorrer entre colisiones. Por tanto, cuanto menor es el volumen, mayor es la presión.
- *Ley de la presión* – Cuando la temperatura de un gas aumenta, la velocidad molecular media aumenta. Las moléculas colisionan con las paredes con más fuerza y con más frecuencia. (Hay más colisiones con las paredes por segundo). Por tanto, cuanto mayor es la temperatura, mayor es la presión.
- *Ley de Charles* – Cuando la temperatura de un gas aumenta, la velocidad molecular media aumenta, de modo que las moléculas colisionan con las paredes con más frecuencia y con más fuerza. El resultado es una fuerza neta hacia fuera de las paredes y en dirección al recipiente, pero si alguna de las paredes es movible, el gas se expandirá manteniendo la misma presión en el interior de las paredes que en el exterior de ellas. Por tanto, cuanto mayor es la temperatura, mayor es el volumen (aunque solo si el gas puede expandirse libremente).

57 **a** Explica por qué las fuerzas entre las moléculas de un sólido o de un líquido son mucho más intensas que las fuerzas intermoleculares de un gas.
b Pueden las fuerzas intermoleculares alcanzar el valor cero? (Observa la Figura 3.5). Razona tu respuesta.

58 **a** Explica detalladamente lo que les ocurre a las moléculas de un gas caliente colocado en el interior de un recipiente más frío.
b ¿Qué les ocurre a la energía interna y a la temperatura de las paredes y del gas?

59 **a** Explica por qué se predice que la presión de un gas ideal será cero si se enfría hasta –273 °C.
b Si se enfrían suficientemente, los gases reales se condensan y se convierten en líquidos mucho antes de alcanzar la temperatura de –273 °C. Explica esta observación haciendo referencia a las velocidades moleculares y a las fuerzas intermoleculares.

60 Copia las Figuras 3.38a y 3.38b y añade a continuación otra línea isoterma a cada una con el objeto de representar los resultados que se obtendrían con el mismo gas y el mismo aparato pero a mayor temperatura.

Perspectivas adicionales

Comprender la aleatoriedad

A lo largo de este tema se ha utilizado frecuentemente el término «aleatorio» con respecto a la energía o al movimiento. ¿Pero qué significa exactamente la palabra «aleatorio»? Esta palabra tiene diversos usos científicos y, generalmente, con ligeras diferencias de significado. Por ejemplo, podemos decir que el resultado de lanzar un dado con seis caras es aleatorio porque no podemos predecir qué ocurrirá, aunque probablemente entendamos que hay una posibilidad entre seis de que salga cada uno de los seis posibles resultados. En este caso, todos los resultados son igualmente probables. Otro ejemplo podría ser el de «escoger una carta al azar» de una baraja de 52 cartas. A veces utilizamos el término «aleatorio» para sugerir que algo no está planificado, por ejemplo un turista puede caminar aleatoriamente por las calles de una ciudad.

La impredecibilidad es una característica fundamental de los sucesos aleatorios y ciertamente es en gran parte lo que queremos expresar cuando decimos que una molécula de un gas se mueve aleatoriamente. Todas las posibles direcciones del movimiento pueden ser igualmente probables, pero no se puede decir lo mismo para las velocidades. Algunas velocidades son indudablemente más probables que otras. Por ejemplo, a temperatura ambiente una velocidad molecular de $500\,m\,s^{-1}$ es mucho más probable que una de $50\,m\,s^{-1}$. De manera análoga, cuando nos referimos a las energías cinéticas aleatorias de las moléculas (en cualquiera de las tres fases de la materia) estamos diciendo que no podemos conocer o predecir la energía de las moléculas individualmente, aunque algunos valores son más probables que otros. Pero aún existe otro significado que va más allá: estamos sugiriendo que las moléculas individuales se comportan de forma independiente y que sus energías están desordenadas.

Aunque resulte sorprendente, en la teoría cinética el comportamiento aleatorio de un número muy grande de moléculas individuales a escala microscópica conduce a una completa predictibilidad en nuestro mundo macroscópico cotidiano. Ideas similares se producen en otras áreas de la física, sobre todo en la desintegración radiactiva (Capítulo 7), donde el comportamiento de un átomo individual no se puede conocer, pero la actividad total de una fuente radiactiva es predecible. Por descontado, las compañías de seguros y los casinos pueden obtener muchas ventajas analizando las estadísticas de las variables aleatorias.

1 Si se lanzan 10 monedas al aire y salen 3 caras y 7 cruces, no nos sorprende demasiado. Pero si lanzamos 100 monedas y solo salen 30 caras, sería extraño. Y si lanzamos 1 000 monedas al aire y salen 300 caras y 700 cruces, sería casi completamente increíble. Explica por qué.

2 Explica por qué las moléculas de un gas consideradas de forma individual colisionan con las paredes del recipiente que lo contiene produciendo una presión que se predice constante.

3 Escoge al azar cinco números entre 1 y 10. ¿Cómo harías la elección? ¿Cómo se podría saber si los números que has escogido están realmente tomados aleatoriamente con solo verlos?

Selección de preguntas de examen

Hoja 1 Cuestiones del IB y cuestiones del tipo IB

1 La temperatura de un gas ideal es una medida de:

A. El momento medio de las moléculas.
B. La velocidad media de las moléculas.
C. La energía cinética de traslación media de las moléculas.
D. La energía potencial media de las moléculas.

2 Si el volumen de una masa fija de un gas ideal a temperatura constante disminuye, la presión del gas aumenta. Esto ocurre porque:

A. Las moléculas colisionan entre sí con mayor frecuencia.
B. Las moléculas colisionan más frecuentemente con las paredes del contenedor.
C. Las moléculas se mueven a una velocidad media más elevada.
D. Las moléculas ejercen fuerzas medias más intensas sobre las paredes durante las colisiones.

3 La capacidad calorífica específica de una sustancia se define como la cantidad de energía térmica que se necesita para aumentar la temperatura de:

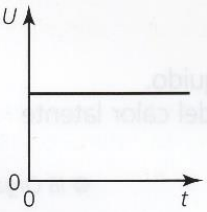
A. La masa de la sustancia en 1 K.
B. El volumen de la sustancia en 1 K.
C. Una unidad de volumen de la sustancia en 1 K.
D. Una unidad de masa de la sustancia en 1 K.

4 ¿Cuál de los siguientes supuestos es fundamental para la teoría cinética de los gases ideales?

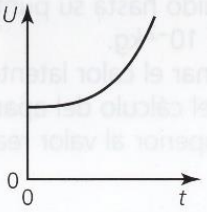
A. Las fuerzas entre las moléculas son cero.
B. Todas las moléculas viajan a la misma velocidad.
C. Las energías potenciales moleculares son constantes.
D. Las moléculas tienen momento cero.

5 Un sistema está compuesto por un cubito de hielo colocado en una taza con agua. El sistema está aislado de su entorno desde el punto de vista térmico. El agua se encuentra originalmente a 20 °C. ¿Cuál de estas gráficas representa mejor la variación de la energía interna total del sistema, *U*, con respecto al tiempo, *t*?

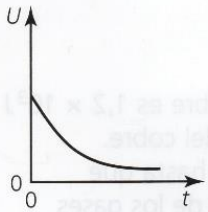
A.



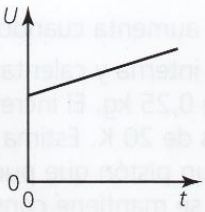
B.



C.



D.



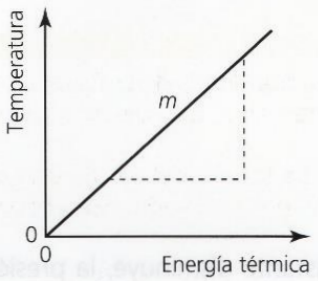
6 ¿Cuál de los siguientes valores corresponde a la conversión correcta de una temperatura de 100 K a grados Celsius

A. –373 °C **B.** –173 °C **C.** 173 °C **D.** 373 °C

7 ¿Cuál de las afirmaciones siguientes es la correcta respecto a la energía de las moléculas de un gas ideal?

A. Las moléculas solo tienen energía cinética.
B. Las moléculas solo tienen energía térmica.
C. Las moléculas solo tienen energía potencial.
D. Las moléculas solo tienen energía cinética y energía potencial.

8 Un bloque de cobre de masa M se calienta mediante un calentador de inmersión. En la gráfica se representa la variación de la temperatura del bloque en función de la energía térmica suministrada. La pendiente de la recta es m.



¿Cuál de las expresiones siguientes corresponde a la capacidad calorífica específica del bloque?

A. m **B.** $\frac{1}{m}$ **C.** mM **D.** $\frac{1}{mM}$

© IB Organization

9 La temperatura de un gas ideal ha aumentado de 50 °C hasta 100 °C. La energía cinética de traslación media de sus moléculas ha aumentado un factor:

A. 1,2 **B.** 2,0 **C.** 4,0 **D.** 50

10 Dos objetos cercanos se encuentran a la misma temperatura. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es correcta?

A. Los objetos tienen la misma energía interna.
B. Los objetos tienen la misma capacidad térmica.
C. No hay intercambio de energía térmica entre los objetos.
D. El intercambio neto de energía térmica entre los objetos es cero.

© IB Organization

Hoja 2 Preguntas del IB y preguntas del tipo IB

1 Esta cuestión es sobre el cambio de fase de un líquido y el calor latente de vaporización.

a. Un líquido en un calorímetro se calienta hasta su punto de ebullición durante un periodo de tiempo contabilizado. Se dispone de los datos siguientes:
potencia del calentador = 15 W
tiempo durante el que se calienta el líquido hasta su punto de ebullición = $4,5 \times 10^2$ s
masa de líquido que se evapora = $1,8 \times 10^{-2}$ kg.
Utiliza los datos anteriores para determinar el calor latente específico de vaporización del líquido. (1)

b. Enuncia y explica un motivo por el que el cálculo del apartado anterior da lugar a un valor del calor latente específico de vaporización del líquido superior al valor real. (2)

© IB Organization

2 a La energía interna de un trozo de cobre aumenta cuando se calienta.

i. Explica qué se entiende por energía interna y calentamiento en este contexto. (3)

ii. El trozo de cobre tiene una masa de 0,25 kg. El incremento en la energía interna del cobre es $1,2 \times 10^3$ J y el incremento de temperatura es de 20 K. Estima la capacidad calorífica específica del cobre. (2)

b. Se deja un gas ideal en un cilindro con un pistón que puede desplazarse. Se calienta el gas hasta que su energía interna aumenta y la presión se mantiene constante. Utiliza el modelo molecular de los gases ideales para explicar:

i. el incremento de energía interna (1)

ii. cómo permanece constante la presión. (3)

© IB Organization

3 a ¿Bajo qué condiciones puede aplicarse la ecuación $pV = nRT$ a los gases reales? (2)

b. Un globo que contiene aire se deja en un congelador a una temperatura de −8,8 °C. Cuando su volumen es de 210 cm^3 y su presión es $1,60 \times 10^5$ Pa se traslada y se coloca en el exterior, donde la temperatura es 31 °C. Si el volumen aumenta hasta 224 cm^3, ¿cuál es la nueva presión en el interior del globo? (2)

c. Si el globo contuviera un poco de agua, explica qué diferencias cabría esperar. (2)

4 Ondas

IDEAS FUNDAMENTALES

- El estudio de las oscilaciones es básico en muchas áreas de la física en las que aparece el movimiento armónico simple (MAS), una oscilación fundamental que tiene lugar en diversos fenómenos naturales.
- Se pueden estudiar muchos tipos de ondas. La característica común que comparten todas las ondas viajeras consiste en que transportan energía, pero el medio por el que viajan en general no queda perturbado de forma permanente.
- Todas las ondas se pueden describir mediante los mismos conjuntos de ideas matemáticas. Si conocemos con detalle lo que ocurre en una determinada zona tenemos la posibilidad de predecir lo que sucederá en otra.
- Las ondas interactúan con el medio y con otras ondas de varias maneras que pueden llegar a ser inesperadas y útiles.
- Cuando las ondas viajeras se encuentran, se pueden superponer para formar ondas estacionarias en las que no se produce transferencia de energía.

4.1 Oscilaciones

El estudio de las oscilaciones es básico en muchas áreas de la física en las que aparece el movimiento armónico simple (MAS), una oscilación fundamental que tiene lugar en diversos fenómenos naturales

Los diversos tipos de oscilación que se enumeran abajo muestran hasta qué punto las oscilaciones forman parte del mundo que nos rodea y sugieren por qué su estudio constituye una parte tan importante de la física. Aunque los objetos que pueden oscilar son muy diversos, la mayor parte de los movimientos oscilatorios se puede estudiar y comprender mejor mediante un modelo simple denominado **movimiento armónico simple**.



Figura 4.1
Oscilaciones de las alas de un colibrí

Ejemplos de oscilaciones

Existen muchas clases de movimientos repetidos, tanto en la naturaleza como en el mundo artificial en el que vivimos. Algunos ejemplos de estas oscilaciones son:

- las mareas del océano
- el movimiento de nuestras piernas cuando caminamos
- el latido del corazón
- un mecanismo de relojería
- la vibración de los átomos
- los mecanismos y los motores
- una cuerda de guitarra que emite una nota musical
- nuestros tímpanos (cuando escuchan un sonido)
- los circuitos electrónicos que producen ondas de radio y microondas
- las ondas de diversos tipos, entre las que se encuentra la luz, que se transmite mediante oscilaciones.

Y existen muchísimos más ejemplos que se pueden encontrar en la ingeniería mecánica y eléctrica.

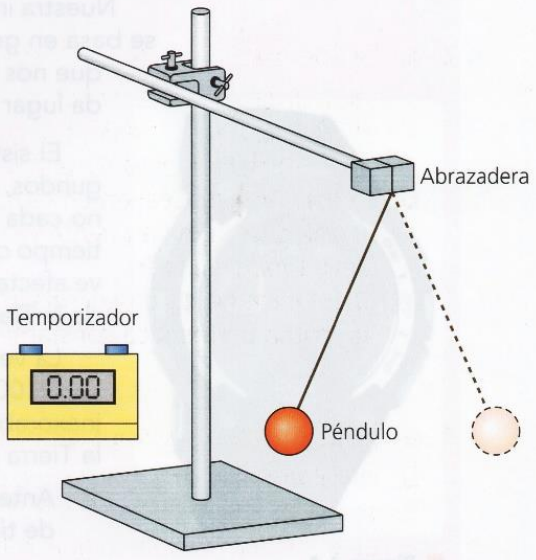


Figura 4.2
Estudio del movimiento de un péndulo

Las oscilaciones pueden ser muy rápidas y difíciles de observar. En un laboratorio escolar se suele comenzar el estudio de las oscilaciones con experimentos realizados con osciladores muy simples, que son fáciles de visualizar y que oscilan a velocidades apropiadas, por ejemplo un péndulo o una masa que cuelga de un muelle (o entre dos muelles) (véanse Figuras 4.2 y 4.3). Estos dos osciladores tan simples se comportan de forma similar a otros mucho más complejos, de modo que los podemos utilizar como **modelos** básicos que podemos aplicar a otras situaciones.

Para el estudio detallado de oscilaciones muy lentas puede resultar muy útil un túnel de viento suavemente curvado en el plano vertical. En un laboratorio escolar también se pueden estudiar otras oscilaciones, como la de una masa que vibra en el extremo de una regla, la de un líquido en un tubo en forma de U, la de una pelota que rueda por una superficie curvada o la del hielo que flota en el agua.

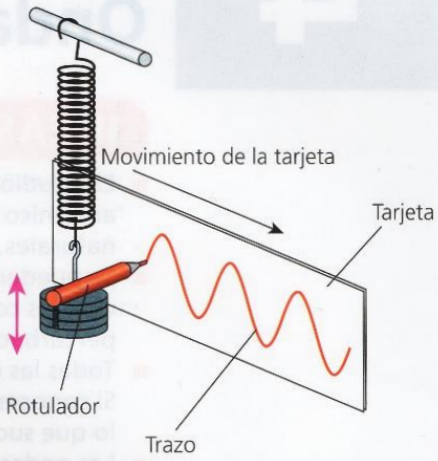


Figura 4.3 *Estudio de la oscilación de una masa colocada en el extremo de un muelle*

Oscilaciones armónicas simples

Los experimentos como los que se representan en la Figura 4.2 y en la Figura 4.3 demuestran una importante propiedad de muchos osciladores: para un oscilador determinado, el tiempo que tarda en producirse cada oscilación es el mismo, con independencia del desplazamiento inicial. Esto significa que cuando la energía se disipa (y en consecuencia las velocidades máximas y los desplazamientos disminuyen) el tiempo que tarda en producirse cada oscilación *sigue* siendo el mismo.

La palabra **isócrono** se utiliza para describir sucesos que ocupan tiempos iguales. En el mundo macroscópico las oscilaciones perfectamente isócronas no son posibles, pero muchas oscilaciones reales (un péndulo, por ejemplo) son casi isócronas. Este tipo de oscilaciones se conocen como **oscilaciones armónicas simples**.

Aplicaciones

Oscilaciones y medida del tiempo

Desde mediados del siglo XVII y hasta hace menos de un siglo, en los relojes más fiables y exactos del mundo se han utilizado péndulos. En la actualidad, en cambio, se emplean de forma generalizada las oscilaciones electrónicas isócronas. En el mundo moderno existen muchos motivos (por ejemplo viajes, comunicaciones por ordenador y detectores de ubicación) por los que es necesario que los distintos países se pongan de acuerdo en cuanto a los procedimientos de registro del tiempo y la sincronización de relojes a nivel mundial. El uso de Internet facilita todos estos acuerdos.

Nuestra impresión sobre el paso del tiempo es un interesante tema filosófico y científico que se basa en gran parte en la repetición de sucesos, como el giro diario de la Tierra sobre su eje, que nos proporciona la noche y el día, o la órbita anual de la Tierra alrededor del Sol, que da lugar a las estaciones.



Figura 4.4
El funcionamiento de un reloj digital se basa en oscilaciones eléctricas

El sistema de tiempo del planeta Tierra, consistente en años, días, horas, minutos y segundos, le parecería extraño a un extraterrestre. De hecho, la Tierra gira una vez sobre su eje no cada 24 horas, sino cada 23 horas y 56 minutos. Nuestro día de 24 horas se basa en el tiempo que tarda el Sol en volver a su elevación máxima visto desde la Tierra. Este tiempo se ve afectado no solo por la propia rotación de la Tierra, sino también por el movimiento diario de la Tierra en su órbita alrededor del Sol, aunque en mucha menor cuantía.

La velocidad de rotación de la Tierra también disminuye a una tasa de unos 2 segundos cada 100 000 años, de manera que la longitud de un día va lentamente en aumento de forma inexorable. Este fenómeno tiene su origen principalmente en la interacción gravitatoria entre la Tierra y la Luna.

1 Antes de la invención de los relojes de péndulo, ¿cómo se medían los intervalos cortos de tiempo?

2 Imagina que estás mirando una grabación en video del balanceo de un péndulo. Explica cómo podrías saber si el video se está reproduciendo hacia delante o hacia atrás. Discute si esto nos ayuda a entender el significado del tiempo.

Periodo, frecuencia, amplitud, desplazamiento y diferencia de fase

El motivo por el que una oscilación puede ser armónica y simple se discute más adelante en este capítulo. En primer lugar necesitamos definir la terminología básica que empleamos para describir las oscilaciones.

Se pueden producir oscilaciones siempre que un objeto se desplaza de su **posición de equilibrio** y experimenta a continuación una **fuerza de «recuperación»** que lo devuelve al lugar de donde venía, ya sea tirando del objeto o empujándolo. El objeto gana energía cinética y pasa por la posición de equilibrio, pero ahora su desplazamiento se produce en sentido contrario al desplazamiento original. La fuerza de recuperación actúa también en sentido contrario de forma que el objeto decelera, se para y vuelve a acelerar para volver de nuevo a la posición de equilibrio. El proceso se sigue repitiendo.

La posición de equilibrio (o posición media) es la posición en la que no actúa ninguna fuerza resultante sobre el objeto. En otras palabras, la posición de equilibrio es el lugar donde se quedaría el objeto si no hubiera sido perturbado y el lugar al que tiende a volver cuando las oscilaciones han terminado.

El **desplazamiento**, x, de un oscilador se define como la distancia en una dirección determinada desde su posición de equilibrio.

(Es una definición análoga a la definición general de desplazamiento de la página 21). Durante una oscilación el desplazamiento varía de forma continua.

Cuando describimos el movimiento repetido de un objeto se pueden plantear dos preguntas evidentes: ¿qué extensión tienen las oscilaciones? Y, ¿con qué rapidez oscila el objeto?

La **amplitud** de un oscilador se define como su desplazamiento máximo. El desplazamiento máximo es la distancia desde la posición de equilibrio hasta el punto más lejano del recorrido.

Utilizamos el símbolo x_0 (o a veces A) para la amplitud. Una amplitud mayor significa que hay más energía en el sistema.

El **periodo**, T, de una oscilación es el tiempo que tarda en producirse una oscilación completa. Es decir, el tiempo mínimo necesario para volver a la misma posición (desplazándose en la misma dirección).

Una oscilación completa se suele denominar un **ciclo**.

La mayoría de las oscilaciones son rápidas, es decir, puede haber un gran número de oscilaciones cada segundo. En consecuencia, suele ser más conveniente referirse al número de oscilaciones cada segundo (más que al periodo).

La **frecuencia**, f, de un oscilador se define como el número de oscilaciones por unidad de tiempo (normalmente cada segundo).

Cuando un objeto experimenta una perturbación y se le deja oscilar sin interferencias, se dice que oscila a su **frecuencia natural**.

La frecuencia y el periodo de una oscilación son dos formas equivalentes de expresar una misma información. Ambos conceptos están conectados por la sencilla fórmula:

$$T = \frac{1}{f}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

El concepto de frecuencia es tan útil que tiene su propia unidad. Una frecuencia de una oscilación por segundo recibe el nombre de **hercio**, Hz. También se utilizan a menudo las unidades kHz (10^3 Hz), MHz (10^6 Hz) y GHz (10^9 Hz).

Diferencia de fase

Es posible que queramos comparar dos o más oscilaciones similares que tienen la misma frecuencia. Por ejemplo, las de varios niños que se columpian juntos en un parque, como en la Figura 4.5.



Figura 4.5
Cuatro oscilaciones desfasadas

Si dos oscilaciones continúan haciendo exactamente lo mismo en el mismo momento, se dice que están **en fase (sincronizadas)**: siempre pasan por su posición de equilibrio moviéndose en la misma dirección y en el mismo momento. En este contexto la palabra «fase» significa un estadio en un proceso (oscilación). No debe confundirse con una fase de la materia (Capítulo 3).

Si dos oscilaciones similares no se están moviendo en fase, decimos que presentan una **diferencia de fase**.

Si una oscilación siempre se «adelanta» a la otra exactamente media oscilación (o se «atrasa» media oscilación), ambas oscilaciones se mueven en sentido opuesto cuando pasan por la posición de equilibrio y se dice que están **en contrafase**.

Dos oscilaciones pueden estar desfasadas en una determinada cantidad entre estos dos extremos, pero la medida detallada de la diferencia de fase no es temario de este capítulo (véase el Capítulo 9).

Ejemplo resuelto

1 Un niño que se está columpiando hace cuatro oscilaciones completas en 10,4 s.

a ¿Cuál es el periodo?
b ¿Cuál es la frecuencia?

a $T = \frac{10,4}{5,00} = 2,08\,\text{s}$

b $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2,08} = 0,481\,\text{Hz}$

1 Se temporiza el movimiento de un péndulo y se determina que produce exactamente 50 oscilaciones en 43,6 s.

a ¿Cuál es su periodo?
b ¿Cuál es su frecuencia?
c ¿Cuántas oscilaciones se producirán en 5 minutos exactamente?
d Explica por qué es una buena idea que en un experimento para determinar el periodo de un péndulo se mida el tiempo total que se tarda en realizar un gran número de oscilaciones.

2 ¿Cuál es el periodo de una onda de sonido que tiene una frecuencia de 3,2 kHz?

3 Las ondas de radio oscilan muy rápidamente.
   a ¿Cuál es la frecuencia en Hz de una onda de radio con un periodo de 5×10^{-9} s?
   b Expresa la misma frecuencia en MHz.

4 Un péndulo tiene una frecuencia de 0,5 Hz y una amplitud (medida a lo largo del arco) de 2,4 cm. Después de soltarlo desde su desplazamiento lateral izquierdo máximo,
   a ¿cuál es su desplazamiento al cabo de:
      i 0,5 s
      ii 3,0 s?
   b ¿Qué distancia ha recorrido al cabo de 5,0 s?
   c Se coloca cerca del péndulo un segundo péndulo idéntico, que se suelta desde su desplazamiento lateral derecho máximo 3 s después de soltar el primer péndulo. Describe la diferencia de fase entre ambos péndulos.

Condiciones del movimiento armónico simple

El tipo más simple de oscilación se produce cuando un objeto, como una masa sujeta a un muelle (Figura 4.3), se desplaza de su posición de equilibrio y experimenta la acción de una fuerza de recuperación, F, proporcional al desplazamiento y en sentido contrario a este. Bajo estas circunstancias, si la amplitud se duplica, la fuerza de recuperación se duplica también para que el objeto siga oscilando con el *mismo periodo*, aunque la amplitud haya variado. En general, una oscilación isócrona se produce cuando:

$$F \propto -x$$

El signo negativo de la expresión anterior indica que la fuerza va en sentido contrario al desplazamiento. En otras palabras, la fuerza se opone al movimiento. Esta es la razón por la que se denomina fuerza de *recuperación*.

Este tipo de oscilación se denomina **movimiento armónico simple (MAS)**. Aunque se trata de un modelo teórico, muchas oscilaciones de la vida real se aproximan bastante a este modelo ideal. El MAS se define en términos de aceleración, pero como esta es proporcional a la fuerza, la relación tiene la misma forma.

El movimiento armónico simple se define como una oscilación en la que la aceleración, a, de un cuerpo es proporcional a su desplazamiento, x, desde su posición de equilibrio y en sentido opuesto a este desplazamiento:

$$a \propto -x$$

Es decir, la aceleración siempre se dirige hacia la posición de equilibrio (tal como indica el signo negativo) o, en otras palabras, el objeto decelera a medida que se aleja de la posición de equilibrio (tal como se muestra en la Figura 4.6). La proporcionalidad se confirma en la Figura 4.6 mediante la línea recta que pasa por el origen. La gráfica fuerza-desplazamiento es similar, con un gradiente cuya magnitud equivale a la *constante de fuerza*.

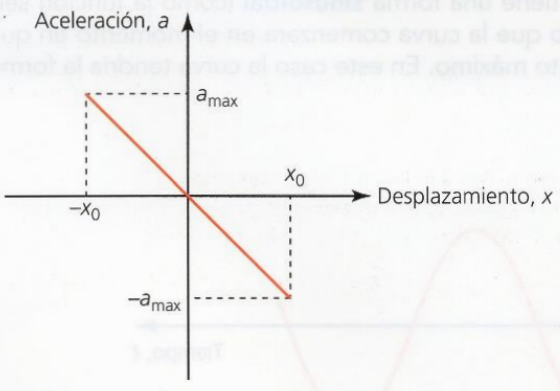


Figura 4.6 *Gráfica aceleración – desplazamiento para el MAS*

Naturaleza de la ciencia

Importancia del modelo MAS

Podemos encontrar movimientos repetitivos (oscilaciones) en muchos aspectos de nuestras vidas. El modelo de las oscilaciones armónicas simples nos puede ayudar a comprender la mayoría de estos movimientos, cuyo estudio desempeña un importante papel en la física (se tratan con más detalle en el Capítulo 9, para alumnos de Nivel Superior). En el laboratorio se pueden estudiar numerosos osciladores simples cuyo movimiento se describe adecuadamente mediante la teoría elemental, pero hay otros muchos osciladores que no encajan suficientemente con la teoría. A partir del modelo MAS se pueden construir otros modelos matemáticos avanzados, y se pueden realizar simulaciones de las oscilaciones mediante ordenador, de manera que se incluya la disipación de energía y por tanto se pueda representar la realidad de una forma más ajustada.

5 **a** Enumera seis elementos de tu hogar o tu escuela que puedan oscilar.
b Razona si la oscilación es isócrona para cada uno de los osciladores anteriores.

6 **a** ¿Crees que una masa que se mueve libremente en vertical, hacia arriba y hacia abajo, en el extremo de una goma elástica, experimenta un movimiento armónico simple?
b Razona tu respuesta.

7 Copia la Figura 4.6. Supón que la gráfica que has dibujado representa el MAS de una masa, m, que oscila verticalmente en el extremo de un muelle cuya constante de fuerza es k. Añade dos rectas a la gráfica que representen las oscilaciones de:
a una masa equivalente a $0{,}5\,m$ sobre el mismo muelle
b una masa m en el extremo del muelle cuya constante de fuerza es $0{,}5\,k$.

Gráficas del movimiento armónico simple

El uso de un sensor de recogida de datos conectado a un ordenador (como se muestra en la Figura 4.7) facilita la producción de gráficas desplazamiento-tiempo para numerosos osciladores.

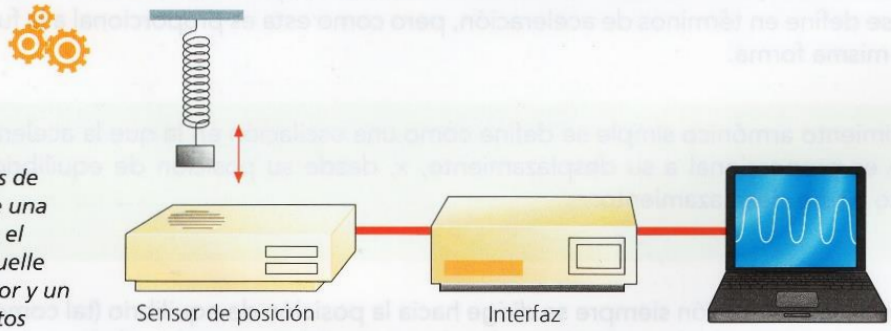


Figura 4.7
Recogida de datos de las oscilaciones de una masa colocada en el extremo de un muelle mediante un sensor y un registrador de datos

En la gráfica de la Figura 4.8 se representa la variación del desplazamiento, x, con el tiempo, t, según nuestro modelo ideal del movimiento armónico simple de una partícula. En este ejemplo hemos *escogido* que la partícula tenga desplazamiento cero al inicio del cuenteo de tiempo, y que su amplitud sea x_0. La curva tiene una forma **sinusoidal** (como la función seno). De la misma manera, podríamos haber escogido que la curva comenzara en el momento en que la partícula estuviera en su punto de desplazamiento máximo. En este caso la curva tendría la forma de la función coseno.

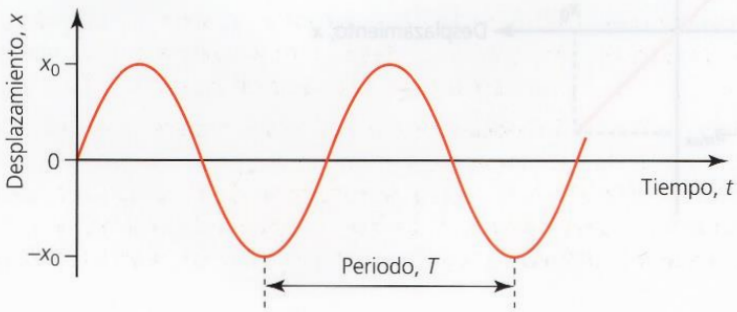


Figura 4.8
Gráfica desplazamiento – tiempo para un movimiento armónico simple representado por una onda sinusoidal; en este caso el tiempo se ha empezado a contar cuando la partícula tenía desplazamiento cero

La velocidad en un instante de tiempo determinado se puede determinar a partir del gradiente de la curva desplazamiento-tiempo en ese punto:

$$\text{velocidad, } v = \frac{\text{cambio en el desplazamiento}}{\text{cambio en el tiempo}} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

De forma similar, la aceleración en un instante de tiempo determinado es el gradiente de la curva velocidad – tiempo:

$$\text{aceleración, } a = \frac{\text{cambio en la velocidad}}{\text{cambio en el tiempo}} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Con esta información podemos dibujar y comparar tres gráficas del movimiento distintas aunque interconectadas, como se muestra en la Figura 4.9.

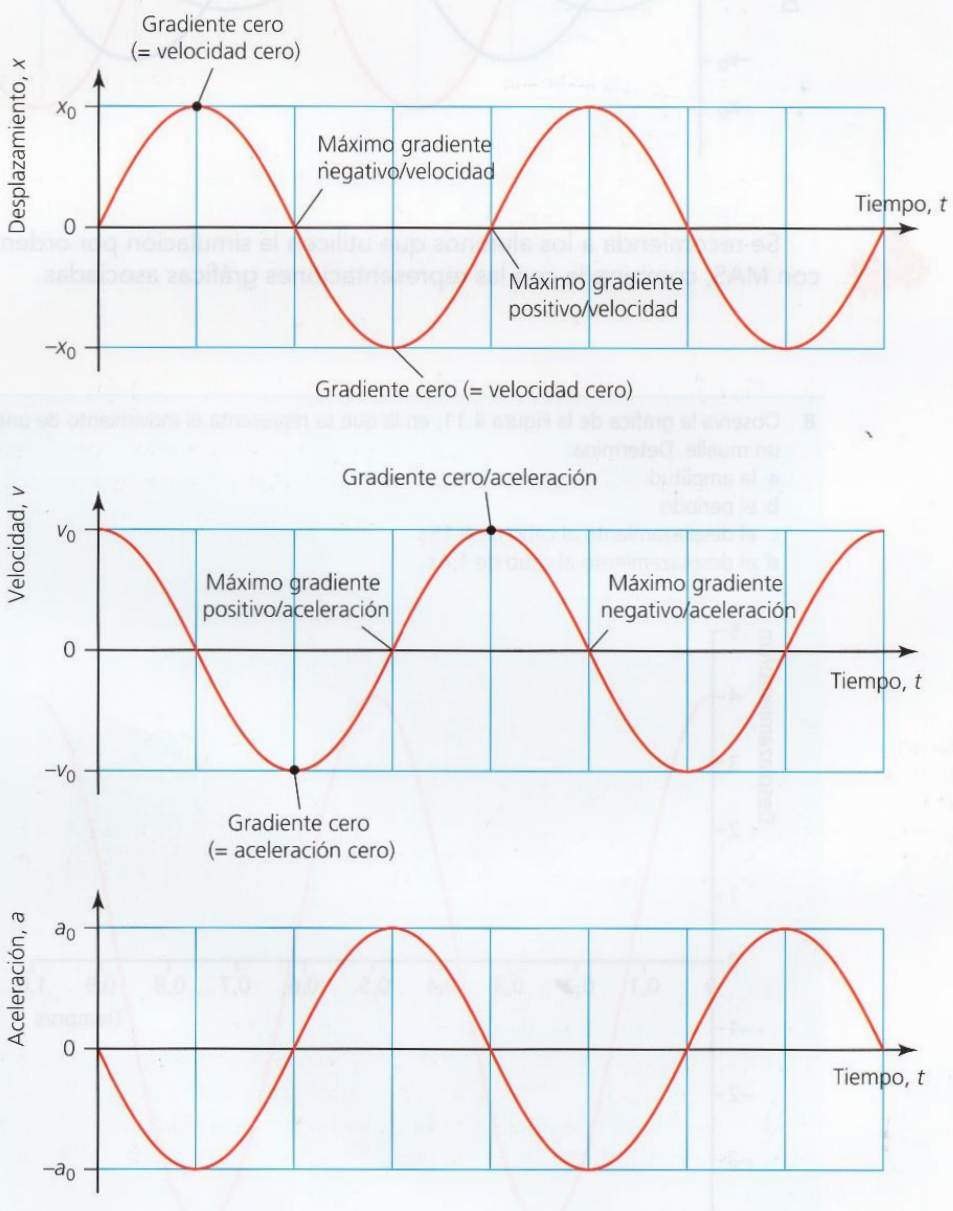
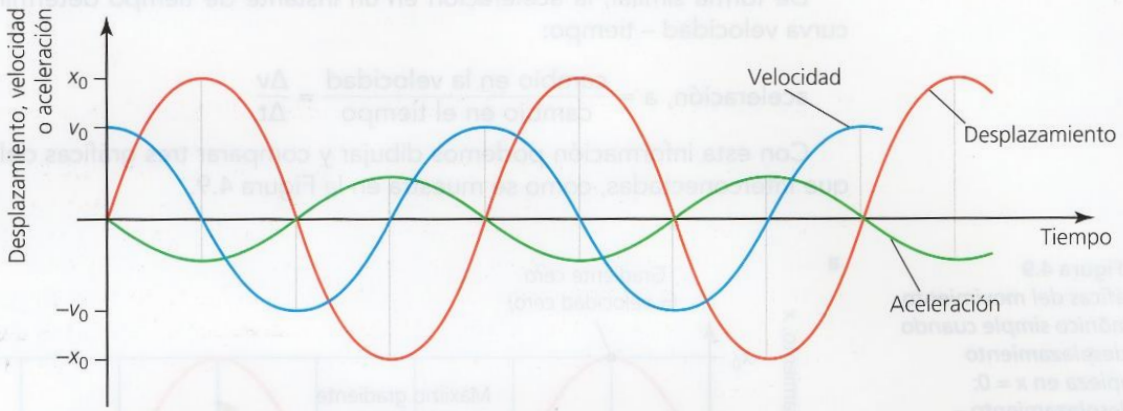


Figura 4.9
Gráficas del movimiento armónico simple cuando el desplazamiento empieza en x = 0:
a *desplazamiento – tiempo;*
b *velocidad – tiempo;*
c *aceleración – tiempo*

Podemos ver que la velocidad alcanza su valor máximo, v_0, cuando el desplazamiento x es cero y que la velocidad es cero cuando el desplazamiento está en su máximo, x_0. En otras palabras, la gráfica de la velocidad está desplazada un cuarto de fase respecto a la gráfica del desplazamiento.

A partir de la Figura 4.9 podemos ver que la aceleración tiene su valor máximo cuando la velocidad es cero y el desplazamiento es máximo. Es justo lo que cabría esperar, porque cuando el desplazamiento es máximo, la fuerza de recuperación (que actúa en sentido contrario) es también máxima. En términos de diferencia de fase, la gráfica de la aceleración está desplazada un cuarto de fase respecto a la gráfica de la velocidad, y media fase respecto a la gráfica del desplazamiento.

En la Figura 4.10 se representan las tres gráficas simultáneamente sobre unos mismos ejes con objeto de compararlas más fácilmente. (Observa que las amplitudes de las tres curvas son arbitrarias, ya que no están interconectadas).

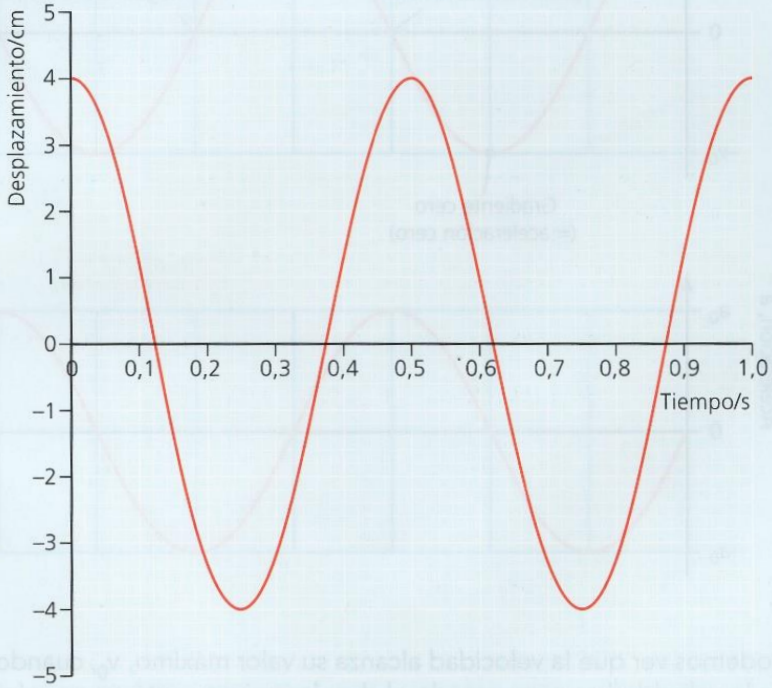


■ **Figura 4.10** *Comparación de las curvas de desplazamiento, velocidad y aceleración para el MAS con el inicio del cuenteo de tiempo en el desplazamiento x = 0*

Se recomienda a los alumnos que utilicen la simulación por ordenador de un objeto que oscile con MAS, combinada con las representaciones gráficas asociadas.

8 Observa la gráfica de la Figura 4.11, en la que se representa el movimiento de una masa que oscila en el extremo de un muelle. Determina:

a la amplitud
b el periodo
c el desplazamiento al cabo de 0,15 s
d el desplazamiento al cabo de 1,4 s.



■ **Figura 4.11**

9 **a** Esboza una gráfica desplazamiento-tiempo en la que se representen dos oscilaciones completas de un oscilador armónico simple, con un periodo de 2,0 s y una amplitud de 5,0 cm.

b Dibuja sobre los mismos ejes la forma de la onda de un oscilador cuya frecuencia es el doble de la anterior y con la misma amplitud.

c Dibuja sobre los mismos ejes la forma de la onda de un oscilador con una amplitud de 2,5 cm y la misma frecuencia del primer oscilador, pero que está desfasado un cuarto de fase respecto a este.

10 **a** Esboza una gráfica velocidad – tiempo en la que se representen dos oscilaciones completas de un oscilador armónico simple, con una frecuencia de 4 Hz y una velocidad máxima de 4,0 cm s^{-1}.
b Esboza sobre los mismos ejes la forma de onda que representa la variación de:
i el desplazamiento
ii la aceleración para la misma oscilación.
c Describe las diferencias de fase entre estas tres gráficas.

Cambios de energía durante las oscilaciones armónicas simples

Cuando desplazamos un objeto de su posición de equilibrio (ya sea empujándolo o tirando de él) en contra de la acción de una fuerza de recuperación, realizamos un trabajo y se almacena energía potencial en el oscilador. Por ejemplo, un muelle almacena energía potencial elástica y un péndulo simple almacena energía potencial gravitatoria. Cuando soltamos el objeto, gana energía cinética y pierde energía potencial a medida que la fuerza lo acelera para volver a su posición de equilibrio y, al mismo tiempo, su energía potencial es cero. Cuando se aleja de su posición de equilibrio, la energía cinética decrece a medida que la fuerza de recuperación se opone a su movimiento y la energía potencial vuelve a aumentar.

A modo de ejemplo consideremos la Figura 4.12, en la que se representa un péndulo que ha sido desplazado de su posición de equilibrio, C, hasta la posición A. Mientras se mantiene en la posición A, su energía cinética es cero y el cambio en la energía potencial gravitatoria (comparada con la de la posición C) es máximo. Cuando se suelta, la gravedad proporciona la fuerza de recuperación y se produce un intercambio de energía potencial en energía cinética a medida que el péndulo se desplaza de la posición B a la C. Cuando el péndulo está en C, la energía cinética es máxima y el cambio en la energía potencial se reduce a cero. A continuación el péndulo vuelve a transferir su energía cinética en energía potencial a medida que se desplaza desde la posición D a la posición E. En la posición E, como en la A, la energía cinética es cero y se produce el cambio máximo de energía potencial. El proceso se repite cada media oscilación.

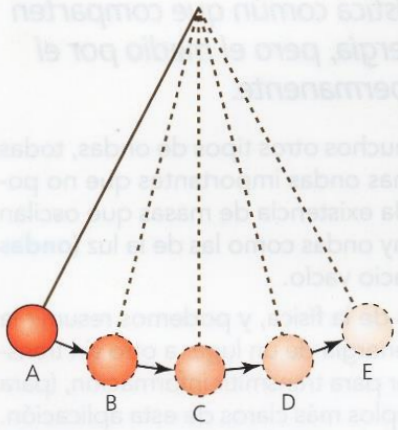


Figura 4.12
Balanceo de un péndulo simple

Si el péndulo fuera un oscilador armónico simple perfecto no habría pérdidas de energía, de manera que la suma de la energía cinética más la energía potencial sería constante y el péndulo continuaría alcanzando la misma altura vertical y la misma velocidad máxima en cada oscilación. En la práctica, las fuerzas de fricción son la causa de la disipación de energía, de manera que todas las energías del péndulo disminuyen progresivamente.

Ejemplo resuelto

2 Un péndulo como el que se muestra en la Figura 4.12 tiene un periodo de 1,5 s.
a Esboza una gráfica donde representes la variación de la energía cinética del péndulo durante un intervalo de tiempo de 3,0 s. (Comienza desde la posición A y supón que no hay transferencia de energía hacia el entorno).
b Esboza una segunda gráfica, sobre los mismos ejes, donde representes los cambios en la energía potencial gravitatoria del péndulo.
c Añade una curva que represente la variación de la energía total.

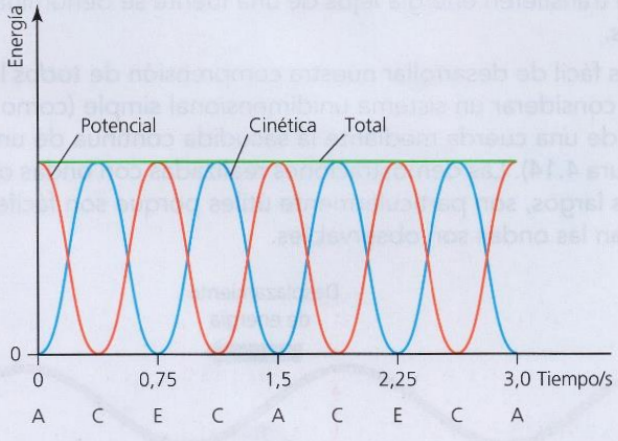


Figura 4.13

11 Describe las transferencias de energía que tienen lugar durante un único ciclo de una masa que oscila en el extremo de un muelle (véase la Figura 4.3).

12 Copia la gráfica de la energía potencial de la Figura 4.13. Añade una segunda curva que represente cómo sería la gráfica si hubiera pérdidas significativas de energía hacia el entorno.

13 Explica por qué un líquido que oscila en el interior de un tubo en forma de U solo completa un máximo de dos oscilaciones antes de que el movimiento oscilatorio se detenga.

Enlace con la teoría del conocimiento

El objetivo primordial de los modelos es la simplificación

El modelo del oscilador armónico es un paradigma de modelo en el que se utiliza una única ecuación para describir un fenómeno. ¿Cómo saben los científicos si un modelo es lo bastante exhaustivo para los requisitos que se le exigen?

¿Es suficiente responder que los científicos deberían estar satisfechos si una determinada teoría o modelo, describe completamente todas las observaciones disponibles? Si existen diferencias entre las predicciones de una teoría o modelo y las observaciones repetidas, ¿hay que mejorar el modelo o incluso reemplazarlo? ¿O bien debemos aceptar que existen situaciones tan complejas que ningún modelo las puede reproducir con exactitud?

4.2 Ondas viajeras

Se pueden estudiar muchos tipos de ondas. La característica común que comparten todas las ondas viajeras consiste en que transportan energía, pero el medio por el que viajan en general no queda perturbado de forma permanente.

Estamos familiarizados con las ondas del agua, pero existen muchos otros tipos de ondas, todas ellas con características similares. Entre ellas se encuentran muchas ondas importantes que no podemos ver. Las **ondas mecánicas**, incluido el sonido, comportan la existencia de masas que oscilan y que necesitan un medio material a través del cual viajar, pero hay ondas como las de la luz (**ondas electromagnéticas**) que también pueden viajar a través del espacio vacío.

El estudio de las ondas es sin duda una parte muy importante de la física, y podemos resumir la importancia de las ondas viajeras diciendo que pueden transferir energía de un lugar a otro sin transferir materia. Además, algunos tipos de ondas se pueden modificar para transmitir información, (para comunicar). Las ondas de sonido y las ondas de radio son los ejemplos más claros de esta aplicación.

Naturaleza de la ciencia

Patrones, tendencias y discrepancias

La búsqueda de **patrones** y similitudes es uno de los principales aspectos de todas las ramas de la ciencia. Sin la existencia de patrones y tendencias, una colección de datos y observaciones desconectadas sería imposible de analizar. En la actualidad reconocemos que la luz, el sonido, las perturbaciones del agua, las cuerdas que vibran (por ejemplo en un instrumento musical) y los terremotos son todos ellos ejemplos de ondas, pero en otras épocas no era nada evidente. Hicieron falta siglos de cuidadosas observaciones para llegar a esta conclusión, que simplifica enormemente nuestro conocimiento del mundo natural. La comprensión de la teoría ondulatoria elemental nos permite aplicar nuestro conocimiento a muchas ramas distintas de la ciencia, desde el movimiento de las galaxias distantes hasta la estructura del átomo.

Ondas viajeras

Las ondas que transfieren energía lejos de una fuente se denominan *ondas viajeras continuas* u *ondas progresivas*.

La manera más fácil de desarrollar nuestra comprensión de *todos* los tipos de ondas viajeras es comenzando por considerar un sistema unidimensional simple (como por ejemplo la onda que se propaga a través de una cuerda mediante la sacudida continua de uno de sus extremos, como se muestra en la Figura 4.14). Las demostraciones realizadas con ondas obtenidas mediante cordeles, cuerdas o muelles largos, son particularmente útiles porque son fáciles de producir y las velocidades a las que viajan las ondas son observables.



Figura 4.14 *Creación de una onda sacudiendo el extremo de una cuerda*

Consideremos el ejemplo ideal de una cuerda que es sacudida verticalmente o lateralmente por un extremo produciendo una oscilación que obedece a un MAS. Las oscilaciones pasan atravesando la cuerda, de una parte a la siguiente, con un retraso. Cada parte de la cuerda, a su vez, hace exactamente lo mismo (si no hay disipación de energía). Es decir, cada parte de la cuerda oscila con un MAS paralelo a la perturbación original. Es fácil imaginar cómo se produce la onda sinusoidal característica (como la que se muestra en la Figura 4.14). Las oscilaciones que transfieren muchos tipos distintos de ondas se pueden considerar armónicas simples.



Figura 4.15
Las olas del océano transfieren una gran cantidad de energía en Brighton (Reino Unido); sin embargo, no hay un movimiento neto continuo del agua en sí misma

Los científicos describen el movimiento de una onda lejos de su fuente como una **propagación**. El **medio** de propagación es cualquier sustancia a través de la que pasa la onda.

Es muy importante remarcar que cuando observamos una onda, a pesar de nuestra impresión de movimiento, el medio en sí *no* se mueve de forma continua en la dirección del movimiento aparente de la onda.

Las ondas viajeras transfieren energía sin transfererir materia. Por ejemplo, las olas del océano pueden «romper» y «estrellarse» contra un rompeolas (Figura 4.15), pero no hay un movimiento continuo neto de agua del mar a causa de las olas. Un bloque de madera flotando sobre el agua oscila simplemente hacia arriba y hacia abajo cuando pasan las olas (en ausencia de viento).

Si una perturbación no es continua, sino que se trata de un suceso aislado (una única oscilación), podemos describir la perturbación que se propaga como un **pulso** de ondas en lugar de una onda.

Ondas transversales y ondas longitudinales

Todas las **ondas** son, o bien **transversales**, o bien **longitudinales**. En primer lugar consideraremos las ondas transversales.

Ondas transversales

Para comprender cómo pasan las ondas a través de un medio continuo, como una cuerda, es útil imaginar un modelo en el que el medio está representado por partículas separadas (discretas), tal como se muestra en la Figura 4.16. La línea de color negro representa una onda transversal que se desplaza hacia la derecha; las flechas indican de qué modo se mueven las partículas en ese momento. La segunda línea, dibujada en rojo, representa la posición de la misma onda un breve intervalo de tiempo después.

Figura 4.16
Movimiento de las partículas del medio cuando la onda transversal se desplaza hacia la derecha



Cada parte del medio hace lo mismo (oscilar con la misma frecuencia y la misma amplitud), pero las distintas partes tienen desplazamientos distintos en cada instante de tiempo. Es decir, las distintas partes del medio no se están moviendo en fase. El tipo de onda que se representa en la Figura 4.16 se denomina onda transversal.

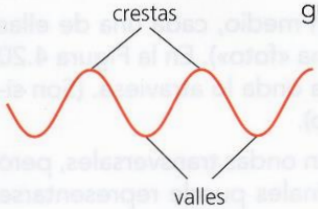


Figura 4.17
Crestas y valles de una onda transversal

En una onda transversal, cada parte del medio oscila *perpendicularmente* a la dirección de transferencia energética de la onda.

Los «picos» de las ondas transversales (especialmente las olas) se denominan **crestas** y los «puntos bajos» se denominan **valles** (Figura 4.17).

Entre los ejemplos de ondas transversales se encuentran la luz (y todas las demás zonas del espectro electromagnético), las olas y las ondas que se generan al tensar una cuerda.

Las ondas mecánicas transversales no pueden atravesar los gases a causa de la aleatoriedad del movimiento de sus partículas.

Ondas longitudinales

En una onda longitudinal, cada parte del medio oscila *paralelamente* a la dirección de transferencia energética de la onda.

Podemos obtener ondas longitudinales mediante un muelle, pero debemos estirarlo primero para que las anillas no estén en contacto. (En las demostraciones prácticas normalmente se utilizan muelles muy «enganchados»). Para que las ondas obtenidas sean longitudinales debemos hacer oscilar el extremo del muelle «hacia delante y hacia atrás» a lo largo de la línea del muelle (idealmente con un MAS).

En la Figura 4.18 se muestra el diagrama de una onda longitudinal obtenida de forma ideal mediante un muelle con las anillas muy enganchadas. En el diagrama se marcan las **compresiones** (zonas donde el muelle es comprimido) y las **rarefacciones** (zonas donde el muelle es estirado) características. Las ondas longitudinales también se suelen denominar **ondas de compresión**.

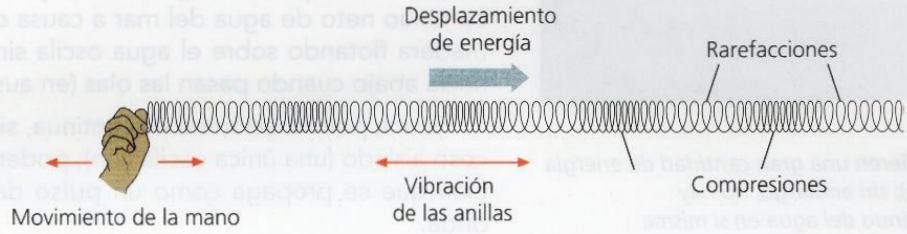


Figura 4.18
Oscilaciones de un muelle que transfiere ondas longitudinales

Igual que en el caso de las ondas transversales, cuando las ondas longitudinales transfieren energía al medio, este no experimenta ningún movimiento de traslación lejos de la fuente.

Entre los ejemplos de ondas longitudinales se encuentran las ondas del sonido y las ondas de compresión en sólidos. Los terremotos producen tanto ondas longitudinales como transversales en las rocas terrestres.

Representación gráfica de las ondas

Para representar ondas (ya sean longitudinales o transversales) se pueden dibujar dos gráficas de aspecto tan similar que pueden llegar a confundirse fácilmente. Se trata de las gráficas desplazamiento – distancia y desplazamiento – tiempo. Compara las Figuras 4.19 y 4.20.

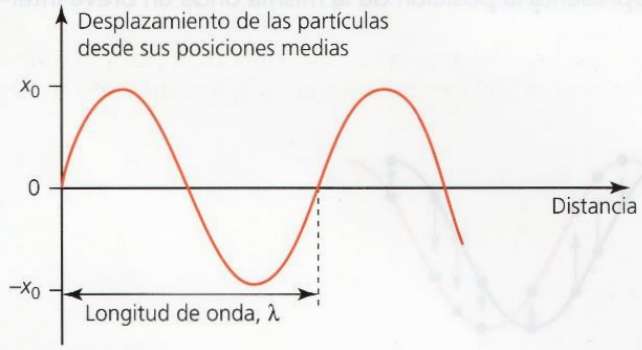


Figura 4.19
Gráfica desplazamiento – distancia para un medio determinado en la que se muestra el significado de la longitud de onda, λ

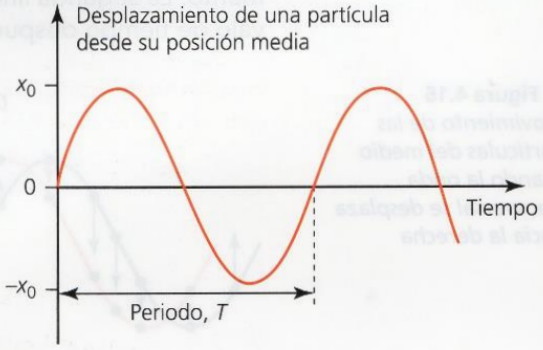


Figura 4.20
Gráfica desplazamiento – tiempo para una partícula individual en la que se muestra el significado del periodo, T

En la Figura 4.19 se representa la posición de *muchas* partes de un medio, cada una de ellas moviéndose con amplitud x_0, en un instante determinado de tiempo (una «foto»). En la Figura 4.20 se representa el movimiento de *una única* parte de un medio cuando la onda lo atraviesa. (Son similares a las gráficas de MAS que se estudiaron al principio del capítulo).

La forma de estas gráficas puede sugerir que únicamente representan ondas transversales, pero es importante destacar que el desplazamiento de las ondas longitudinales puede representarse también mediante gráficas similares. En la Figura 4.21 se muestra cómo puede cambiar la disposición aleatoria de las moléculas del aire cuando lo atraviesa una onda longitudinal de sonido. Las compresiones corresponden a zonas con una presión del aire superior a la presión media y las rarefacciones corresponden a zonas con una presión del aire inferior a la presión media.

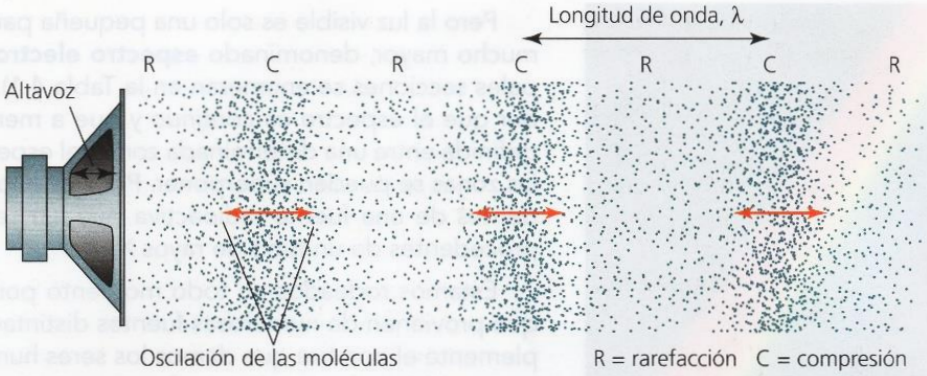


Figura 4.21
Disposición de las moléculas de aire cuando las atraviesa el sonido

Longitud de onda, frecuencia, periodo y velocidad de onda

La **longitud de onda**, λ, se define como la menor distancia entre dos puntos que se mueven en fase.

La longitud de onda se puede identificar fácilmente en una gráfica desplazamiento – posición (Figura 4.19) y se suele medir en metros.

El **periodo**, T, de una onda se define como el tiempo que tarda una onda completa en pasar por un punto dado (o el tiempo que tarda en completarse una oscilación de un punto del medio).

El periodo se puede identificar fácilmente en una gráfica desplazamiento – tiempo (Figura 4.20).

La **frecuencia**, f, de una onda se define como el número de ondas que atraviesan un determinado punto por unidad de tiempo (o número de oscilaciones en un punto dentro del medio por unidad de tiempo).

La **velocidad de onda**, c, se define como la distancia recorrida por una onda en una unidad de tiempo.

Los símbolos v y c se emplean indistintamente para la velocidad de onda, pero la velocidad de las ondas electromagnéticas siempre se representa mediante el símbolo c. Todas las velocidades de onda se acostumbran a medir en $m\,s^{-1}$.

Ecuación de onda

Sabemos que, en general, la velocidad es igual a la distancia recorrida dividida por el tiempo que se ha tardado en recorrerla. Una onda recorre una distancia de una longitud de onda en un periodo T, de manera que $c = \lambda/T$.

O bien, como $T = 1/f$:

$$c = f\lambda$$

velocidad de onda = frecuencia x longitud de onda

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física.*

Se trata de una ecuación muy simple, pero su uso es muy generalizado. Se puede utilizar para todo tipo de ondas.

Es importante comprender que una vez se crea la onda, su frecuencia no puede cambiar. Por tanto, si se produce un cambio de velocidad (por ejemplo después de entrar en un medio distinto) se producirá a su vez un cambio en la longitud de onda (velocidad menor implica longitud de onda menor; velocidad mayor implica longitud de onda mayor).

Naturaleza de las ondas electromagnéticas

La luz viaja en forma de onda transversal y el **espectro** de la luz visible «blanca» (desde el color rojo al violeta), nos resulta familiar (Figura 4.22). Las longitudes de onda de las ondas luminosas son muy pequeñas y los distintos colores del espectro tienen a su vez distintas longitudes de onda. La luz roja tiene la longitud de onda más larga (aproximadamente 7×10^{-7} m) y la luz violeta tiene la longitud de onda más corta del espectro visible (aproximadamente 4×10^{-7} m).



Figura 4.22
Espectro de la luz visible

Pero la luz visible es solo una pequeña parte de un grupo de ondas mucho mayor, denominado **espectro electromagnético** (cuyas principales secciones se enumeran en la Tabla 4.1). Es importante comprender que el espectro es *continuo* y que a menudo no hay una frontera definida entre una determinada zona del espectro y la siguiente, ya que las zonas se pueden superponer. Por ejemplo, los rayos gamma procedentes de una fuente radioactiva pueden ser idénticos a los rayos X procedentes de un tubo de rayos X.

Estamos rodeados en todo momento por muchas de estas ondas, que provienen de numerosas fuentes distintas. El término «luz» es simplemente el nombre que damos los seres humanos a estas ondas electromagnéticas que podemos detectar con nuestros ojos. La única diferencia fundamental entre los diversos tipos de ondas electromagnéticas es su longitud de onda, de modo que no debería sorprendernos que, bajo las circunstancias apropiadas, todas estas ondas transversales exhiban las mismas propiedades ondulatorias fundamentales.

Todas las ondas electromagnéticas pueden viajar a través del espacio vacío exactamente con la misma velocidad, $c = 3{,}00 \times 10^8\,\text{m s}^{-1}$.

Esta constante figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Las ondas electromagnéticas no *necesitan* viajar a través de un medio, pero cuando atraviesan otros materiales, sus velocidades son menores que en el vacío (aunque su velocidad en el aire es casi idéntica a su velocidad en el vacío).

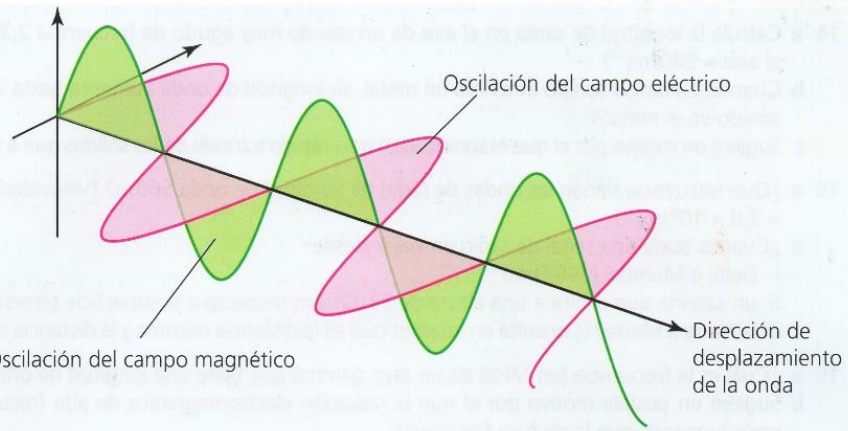
En la Tabla 4.1 se proporciona un breve resumen de las principales zonas del espectro electromagnético. Las ondas con longitudes de onda inferiores a unos 10^{-8} m pueden ser dañinas para el cuerpo humano, incluso a intensidades bajas.

Tabla 4.1
Las distintas zonas del espectro electromagnético

Nombre	Longitud de onda típica	Origen	Algunos usos habituales
ondas de radio	10^2 m	circuitos electrónicos/antenas	comunicaciones, radio, TV
microondas	10^{-2} m	circuitos electrónicos/antenas	comunicaciones, teléfonos móviles, hornos, radar
infrarrojo (IR)	10^{-5} m	todos los objetos emiten infrarrojos pero los más calientes emiten muchos más IR que los más fríos	láseres, calefacción, cocina, tratamientos médicos, controles remotos
luz visible	5×10^{-7} m	objetos muy calientes, bombillas, el Sol	visión, iluminación, láseres
ultravioleta (UV)	10^{-8} m	el Sol, lámparas UV	fluorescencia
rayos X	10^{-11} m	tubos de rayos X	diagnóstico y tratamiento médico, estudio de la estructura de la materia
rayos gamma	10^{-13} m	materiales radioactivos	diagnóstico y tratamiento médico, esterilización de utensilios de uso médico

El intervalo que recorren las distintas longitudes de onda, que va desde menos de 10^{-14} m hasta 10^4 m, es enorme y es importante recordar un orden de magnitud para las principales radiaciones.

La naturaleza exacta de estas ondas constituyó un verdadero rompecabezas científico durante mucho tiempo, porque todos los demás tipos de ondas requieren un medio por el que desplazarse, mientras que las ondas electromagnéticas pueden transferir energía a través del espacio vacío. Actualmente sabemos que estas ondas transversales no están producidas por la oscilación de un medio, sino que están ligadas a la oscilación de campos eléctricos y magnéticos (que no requieren un medio), tal como se muestra en la Figura 4.23; de aquí el nombre de ondas *electromagnéticas*. Sin embargo, estas ondas también poseen algunas propiedades que solo se pueden explicar si las consideramos «partículas» (y no ondas) a las que denominamos **fotones**. Cada fotón transfiere una cantidad individual de energía que depende de su frecuencia. Estas ideas ya no se necesitan aquí y se tratan con más detalle en los apartados 7.3 y 12.1.



■ **Figura 4.23**
Las ondas electromagnéticas son la combinación de campos eléctricos y campos magnéticos

En la Tabla 4.1 no se incluyen los medios de detección de las diversas radiaciones electromagnéticas. La detección y la absorción de las radiaciones electromagnéticas invisibles procedentes de diversas zonas del espectro, así como el estudio de su origen, las hace más «reales».

Existen dos aplicaciones de las ondas electromagnéticas que merece la pena mencionar:

- Las microondas y las ondas de radio se pueden generar con facilidad y se pueden detectar mediante corrientes oscilatorias en los circuitos eléctricos. Las propiedades de estas ondas se pueden modificar para que transporten información (comuniquen) muy rápidamente a larga distancia.



■ **Figura 4.24**
Utilización de las ondas electromagnéticas para las comunicaciones nacionales e internacionales

- El análisis de los espectros de emisión de los gases excitados energéticamente proporciona información sobre los niveles energéticos en el interior de los átomos.

Ejemplo resuelto

3 Las crestas de las olas que llegan a un puerto están separadas 2,1 m y tienen una amplitud de 60 cm. Un observador inmóvil ve pasar diez olas cada minuto.
a ¿Cuál es la frecuencia de las olas?
b ¿Cuál es su velocidad?

a $T = \frac{60}{10} = 6{,}0\,\text{s}$
Así $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{6{,}0} = 0{,}17\,\text{Hz}$

b $v = f\lambda$
$v = 0{,}17 \times 2{,}1 = 0{,}36\,\text{m s}^{-1}$

14 **a** Calcula la longitud de onda en el aire de un sonido muy agudo de frecuencia 2,20 kHz. (Velocidad del sonido en el aire = 340 $m s^{-1}$)
b Cuando el mismo sonido atraviesa un metal, su longitud de onda aumenta hasta 2,05 m. ¿Cuál es la velocidad del sonido en el metal?
c Sugiere un motivo por el que el sonido viaja más rápido a través de los sólidos que a través de los gases (como el aire).

15 **a** ¿Qué frecuencia tienen las ondas de radio de longitud de onda 560 m? (Velocidad de las ondas electromagnéticas = $3,0 \times 10^8 m s^{-1}$)
b ¿Cuánto tarda una señal de radio en viajar desde:
i Delhi a Mumbai (1407 km)
ii un satélite que orbita a una altura de 33 000 km respecto a la superficie terrestre
iii la Tierra a Marte? (Consulta en Internet cuál es la distancia máxima y la distancia mínima entre estos dos planetas.)

16 **a** ¿Cuál es la frecuencia (en MHz) de un rayo gamma que tiene una longitud de onda de $4,4 \times 10^{-12}$ m?
b Sugiere un posible motivo por el que la radiación electromagnética de alta frecuencia es más peligrosa para los seres humanos que la de baja frecuencia.

17 **a** Calcula la longitud de onda de la luz visible de frecuencia $5,5 \times 10^{14}$ Hz.
b Sugiere de qué color puede ser esta luz.
c Parte de la radiación solar tiene una longitud de onda de $6,0 \times 10^{-8}$ m. ¿En qué zona del espectro electromagnético se encuentra esta radiación?

18 La separación total entre cinco crestas de ola en un tanque de oleaje es 5,6 cm. Si las olas están generadas por un vibrador que tiene una frecuencia de 12 Hz, ¿cuánto tardan las olas en recorrer una distancia de 60 cm?

19 Mientras lees estas líneas, ¿qué ondas electromagnéticas hay en la habitación?

Enlace con la teoría del conocimiento

Explicar lo invisible

Los científicos suelen trasladar su percepción de los conceptos tangibles y visibles para explicar conceptos similares no visibles, como ocurre en la teoría ondulatoria. ¿Cómo explican los científicos conceptos que no poseen ni propiedades tangibles ni propiedades visibles?

Las ondas electromagnéticas invisibles no pueden ser observadas directamente, pero se las considera ondas porque, de algún modo, se comportan igual que las ondas que podemos ver (como las ondas de las cuerdas o del agua). Sin embargo, eso no quiere decir que los científicos crean que la descripción ondulatoria de la luz (por ejemplo) sea una descripción adecuada o completa. No hay por qué esperar que las cosas que no podemos observar directamente se comporten del mismo modo que las cosas que sí podemos observar. Algunas de las propiedades de la radiación electromagnética no se pueden explicar mediante la teoría ondulatoria y hay que recurrir a una explicación mediante la teoría de partículas (fotones).

Tampoco podemos ver el sonido pero, ¿significa esto que, como en el caso de la luz, la descripción ondulatoria del sonido es solo una teoría provisional que resulta útil en determinadas ocasiones? Es decir, ¿se pueden explicar la totalidad de las propiedades del sonido mediante la teoría ondulatoria?

Perspectivas adicionales

Heinrich Hertz



Figura 4.25
Heinrich Hertz

La unidad para la frecuencia de una onda recibe su nombre en honor al físico alemán Heinrich Hertz. En 1886 realizó su descubrimiento más famoso, que consistió en comprobar experimentalmente por primera vez que las ondas electromagnéticas (ondas de radio) se podían producir, transmitir y detectar en cualquier lugar. Aunque la distancia alcanzada era muy pequeña, se puede decir que fue el inicio de las modernas comunicaciones inalámbricas. Fueron otros científicos (como Guglielmo Marconi) quienes desarrollaron las técnicas para la transmisión de las ondas a lo largo de distancias cada vez mayores y la posterior modificación de la amplitud, la frecuencia y la fase de las ondas de radio para transportar información (por ejemplo, la voz).

Se le atribuye a Hertz haber dicho que su descubrimiento «no tenía ninguna utilidad», y no era el único que expresaba esa opinión en aquella época. La historia de la ciencia está plagada de afirmaciones y predicciones que más adelante resultan ser incorrectas. En muchas ocasiones la importancia de los descubrimientos y de los inventos solo puede ser comprendida muchos años después. Este es uno de los motivos por los que la mayoría de científicos piensan que sería estúpido limitar la investigación a aquellos proyectos que tienen una aplicación evidente, inmediata y útil.

Desgraciadamente, Hertz contrajo una enfermedad mortal y falleció a los 36 años de edad, cuando habían pasado menos de seis años desde su descubrimiento y mucho tiempo antes de que las repercusiones de su investigación hubieran quedado claras.

1 La investigación científica actual puede ser muy cara. ¿Crees que los países deberían ser lo bastante sabios como para gastar su dinero en otros proyectos (por ejemplo, en mejorar la asistencia médica generalizada) a menos que el objeto de estudio conduzca claramente a un objetivo claro y útil?

Naturaleza de las ondas de sonido

Cuando la superficie de un sólido vibra, perturba el aire (u otro medio) que le rodea y produce una serie de compresiones y rarefacciones (variaciones de la presión) que viajan a través de la superficie en forma de ondas longitudinales. Si estas ondas tienen una frecuencia detectable por nuestros oídos se dice que son ondas de sonido. En la Figura 4.21 se representa la producción de ondas de sonido en el aire mediante un altavoz.

El intervalo normal de audición para los seres humanos, denominado **espectro audible**, está aproximadamente entre 20 Hz y 20 kHz. Las frecuencias más altas se denominan **ultrasonidos**.

El sonido es una onda mecánica que se transmite mediante la oscilación de moléculas, y, como tal, necesita claramente un medio de propagación. El sonido no puede viajar a través del vacío. La comprensión de la naturaleza de las ondas del sonido nos lleva a esperar que viajen mejor a través de materiales en los que las moléculas están muy juntas y hay fuerzas muy intensas entre ellas. Las ondas de sonido viajan mejor a través de líquidos que a través de gases/aire, e incluso mejor a través de sólidos.

Velocidad del sonido

Como la velocidad = distancia/tiempo, para determinar la velocidad del sonido es necesario medir el tiempo que tarda en recorrer una distancia conocida. La velocidad del sonido es elevada, por tanto, para obtener buenos resultados, suele ser necesario utilizar distancias grandes y medir intervalos cortos de tiempo de forma exacta y precisa. Se pueden emplear cronómetros manuales, pero es improbable obtener buenos resultados porque siempre existen los problemas asociados a los tiempos de reacción humanos. A veces, el experimento se realiza en grandes superficies exteriores aisladas que reflejan las ondas de sonido, pero para escuchar un **eco** claramente (separado del sonido original), hace falta que la superficie esté al menos a 50 m de distancia.

En la Figura 4.26 se muestra el principio de un experimento a pequeña escala que se puede llevar a cabo con exactitud en un laboratorio. En la posición A se sitúa una fuente de sonido claro y breve. Cuando la onda de sonido llega al micrófono 1, la señal del micrófono viaja por el conector e indica al temporizador que inicie el cuenteo de tiempo. Cuando la onda llega al micrófono 2, la señal que viaja por el conector indica al temporizador que detenga el cuenteo de tiempo.

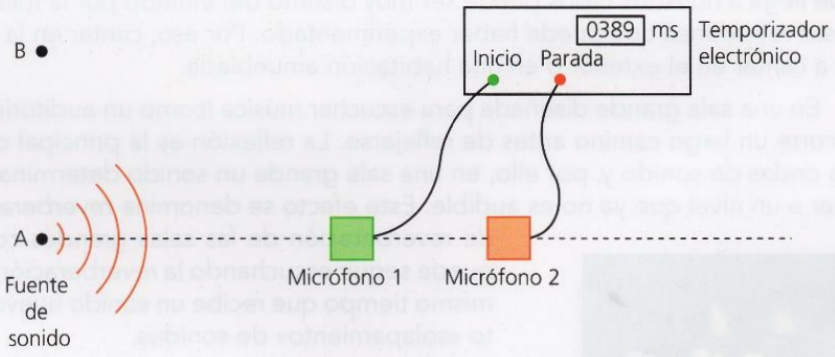


Figura 4.26 *Experimento de laboratorio para determinar la velocidad del sonido*

Ejemplo resuelto

4 Considera el experimento que se representa en la Figura 4.26.
- a i Sugiere cómo se puede producir un sonido «claro y breve».
- ii ¿Por qué se prefiere este tipo de sonido para el experimento?
- b ¿En qué consisten los «problemas asociados a los tiempos de reacción humanos» cuando se utilizan cronómetros manuales para medir intervalos cortos de tiempo?
- c Cuando los micrófonos están separados 1,35 m, el tiempo que indica el temporizador es 389 ms. Calcula el valor de la velocidad del sonido en el laboratorio.
- d ¿Es necesario que los cables que conectan los micrófonos con el temporizador tengan la misma longitud? Razona la respuesta.
- e ¿En qué afectaría a los resultados el hecho de situar la fuente de sonido en B, en lugar de en A?
- f Si el sonido se produce golpeando la mesa del laboratorio, explica por qué el tiempo que muestra el temporizador es mucho menor.

a **i** Por ejemplo, golpeando un soporte para pinzas con un pequeño martillo.

ii Se necesita un sonido claro (con el volumen suficiente) y breve para que los micrófonos puedan enviar señales claras al temporizador.

b El tiempo que transcurre entre que se observa el suceso y se enciende el cronómetro es similar en magnitud al tiempo que se está midiendo. Esto significa que el porcentaje de incertidumbre es elevado. Además, los tiempos de reacción son desconocidos y variables.

c $c = \frac{\Delta s}{\Delta t}$

$c = \frac{1{,}35}{0{,}389} = 347\,\text{m s}^{-1}$

d No, porque la velocidad de las señales a través de los conectores (aproximadamente la velocidad de las ondas electromagnéticas en el aire) es *mucho* más rápida que la velocidad del sonido que se está determinando.

e Se observaría una pequeña diferencia en el tiempo medido, lo que produciría una sobreestimación de la velocidad del sonido (a menos que se tuviera en cuenta el cambio de geometría para la realización de los cálculos).

f En este caso la onda de sonido viaja a través de la mesa de laboratorio a una velocidad mayor que la que tiene en el aire. Puede ser un método para determinar la velocidad del sonido en algunos sólidos.

La velocidad del sonido en un gas depende de la velocidad media de las moléculas del gas. Varía con la temperatura porque, en promedio, las moléculas del gas se mueven más rápido cuanto mayor es esta. A una misma temperatura, la velocidad del sonido será mayor en gases cuyas moléculas tienen masas menores y, por tanto, velocidades moleculares medias elevadas (como el hidrógeno, por ejemplo). Además de los experimentos para determinar la velocidad del sonido en distintos medios, se pueden diseñar experimentos para estudiar la velocidad del sonido en un gas en función del tipo de gas, la frecuencia del sonido y la temperatura.

Aplicaciones

Reflexión del sonido en salas grandes

El sonido se refleja bien sobre superficies duras, como las paredes, mientras que las superficies blandas, como las de las cortinas, alfombras, cojines y vestidos, tienden a absorberlo. El sonido que llega a nuestros oídos puede ser muy distinto del emitido por la fuente a causa de las numerosas reflexiones que puede haber experimentado. Por eso, cantar en la ducha suena muy distinto a cantar en el exterior o en una habitación amueblada.

En una sala grande diseñada para escuchar música (como un auditorio, Figura 4.27), el sonido recorre un largo camino antes de reflejarse. La reflexión es la principal causa de la absorción de las ondas de sonido y, por ello, en una sala grande un sonido determinado tarda más tiempo en caer a un nivel que ya no es audible. Este efecto se denomina *reverberación*. Los largos tiempos de reverberación de las salas grandes comportan que el oyente puede seguir escuchando la reverberación de un sonido anterior al mismo tiempo que recibe un sonido nuevo. Es decir, existe un cierto «solapamiento» de sonidos.



Figura 4.27
Un gran auditorio diseñado para una transmisión efectiva del sonido

Cuando se graba música en un estudio hay que tener en cuenta las reflexiones del sonido sobre las paredes, el suelo y el techo, aunque algunos de estos efectos se pueden añadir o eliminar electrónicamente una vez se ha grabado el sonido.

1 Sugiere por qué las superficies blandas absorben bien el sonido.

2 Los ingenieros acústicos, que son los responsables de la calidad de sonido en un auditorio, ¿prefieren obtener tiempos de reverberación cortos o largos? ¿Cómo se puede modificar el tiempo de reverberación de un sonido?

3 Averigua qué son las cámaras anecoicas y para qué se utilizan.

20 La velocidad del sonido en aire a una temperatura de 20 °C es 343 $m s^{-1}$.
- **a** Calcula cuánto tarda el sonido en reflejarse desde una pared que se encuentra a 50 m.
- **b** Estima el porcentaje de incertidumbre si este tiempo se midiera con un cronómetro de mano.

21 **a** Describe un experimento realizado en el exterior para determinar la velocidad del sonido en el aire en el que se empleen cronómetros manuales para medir el tiempo.
- **b** Enumera dos motivos por los que este experimento no se puede llevar a cabo en el interior de un edificio.

22 Explica por qué las moléculas de hidrógeno tienen una mayor velocidad media que las moléculas de oxígeno a la misma temperatura.

23 Considera el Ejemplo resuelto 4. Utiliza Internet para averiguar la temperatura aproximada del laboratorio.

24 La velocidad del sonido en el agua de mar es 1540 $m s^{-1}$ y la velocidad en agua destilada a la misma temperatura es 1490 $m s^{-1}$.
- **a** Sugiere un motivo para esta diferencia de velocidades.
- **b** Las ballenas se pueden comunicar entre sí a una distancia de unos 100 km. ¿Cuánto tarda el sonido en atravesar esta distancia?
- **c** Se cree que hace siglos las ballenas se podían comunicar a través de distancias mucho mayores. Sugiere una razón para ello.
- **d** Existe un determinado tipo de ballenas que «canta» a una frecuencia de 50 Hz. ¿A qué longitud de onda corresponde?

25 Los aparatos de escáner mediante ultrasonidos se utilizan ampliamente en los hospitales para el diagnóstico de enfermedades. Para penetrar y examinar distintas partes del cuerpo se necesitan distintas longitudes de onda y se producen imágenes de diversa nitidez. Si la velocidad de una onda ultrasónica en el músculo es 1580 $m s^{-1}$, ¿qué frecuencia se necesita para producir una longitud de onda de 0,50 mm?

4.3 Características de las ondas

Todas las ondas se pueden describir mediante los mismos conjuntos de ideas matemáticas. Si conocemos con detalle lo que ocurre en una determinada zona, tenemos la posibilidad de predecir lo que sucederá en otra

Ondas bidimensionales

Hasta ahora hemos estudiado ondas en un medio unidimensional, como una cuerda, y debemos ampliar nuestro conocimiento considerando ondas que viajan en dos dimensiones. Puede ser útil pensar en primer lugar en las olas generadas en la superficie del agua, que a todos nos resultan familiares (Figura 4.28). Para observar el comportamiento de las olas, en los laboratorios se suelen utilizar las pequeñas olas (rizos) generadas en tanques de agua con poca profundidad. En la Figura 4.29 se representa uno de estos tanques de oleaje.

Para crear olas en una superficie plana de agua debemos perturbar el agua de algún modo, por ejemplo introduciendo y sacando repetidamente un dedo (o un palo) del agua. Las olas del océano están producidas principalmente por el viento. Cada región del agua afecta al agua que la rodea, de manera que la oscilación atraviesa la fuente y se aleja de ella, con un tiempo de retraso. Las olas de un tanque de oleaje se pueden generar de manera continua mediante un motor que hace vibrar un pequeño cucharón o mango suspendido en la superficie del agua.



Figura 4.28
Olas circulares propagándose en un estanque

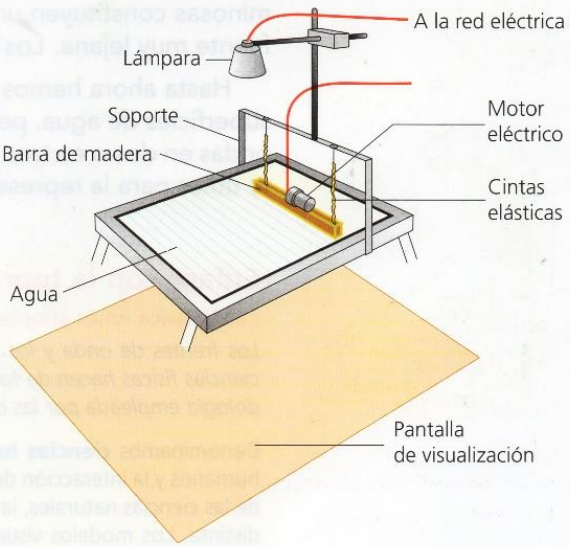


Figura 4.29
Un tanque de oleaje utilizado para estudiar el comportamiento de las olas

Frentes de onda y rayos

Cuando observamos ondas, habitualmente concentramos nuestra atención en las crestas. En cambio, si observamos desde arriba las ondas que se propagan a través de una superficie plana de agua, vemos que lo hacen en forma de círculos con igual velocidad en todas las direcciones.

Aunque las ondas viajeras se desplazan, a veces lo que nos interesa es representar su forma (y no su movimiento) en el papel o en una pantalla. Si dibujamos la posición momentánea de una onda en movimiento, las líneas que dibujamos se denominan **frentes de onda**. Un frente de onda es una línea que une los puntos adyacentes que se mueven en fase (por ejemplo una línea que une puntos donde hay crestas o donde hay valles). La distancia entre frentes de onda adyacentes es una *longitud de onda*.

En la Figura 4.30 se muestran los frentes de onda circulares que se propagan desde una fuente puntual. Las líneas que apuntan en las direcciones hacia donde se produce la transferencia de energía de la onda se denominan **rayos**. Un rayo siempre es perpendicular a los frentes de onda que representa. El movimiento del frente de ondas circular se representa mediante rayos radiales que se propagan desde una fuente puntual, como se muestra en la Figura 4.30.

En la Figura 4.31 se representan las ondas que podrían provenir de la oscilación de una varilla en una superficie de agua. Los frentes de onda como los de esta figura, paralelos entre sí, se denominan **frentes de onda planos**. El movimiento de los frentes de onda planos se representa mediante rayos *paralelos*.



Figura 4.30
Frentes de onda circulares y rayos radiales propagándose desde una fuente puntual

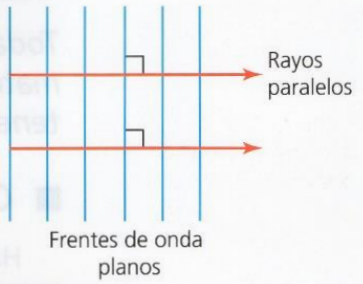


Figura 4.31
Frentes de onda planos y rayos paralelos que no se están propagando

Cuando los frentes de ondas circulares recorren un largo camino desde la fuente, empiezan a ser cada vez más paralelos y acaban siendo prácticamente frentes de ondas planos. Las ondas luminosas constituyen un importante ejemplo de este fenómeno, dado que provienen del Sol, una fuente muy lejana. Los frentes de onda procedentes del Sol se suelen considerar planos.

Hasta ahora hemos descrito los frentes de ondas en términos de ondas bidimensionales sobre superficies de agua, pero podemos emplear ideas y terminología análogas para describir *todas* las ondas en dos o en tres dimensiones. Las simulaciones por ordenador pueden resultar especialmente útiles para la representación de ondas que se propagan en tres dimensiones.

Enlace con la teoría del conocimiento

¿Es la física «más simple» que otras áreas del conocimiento?

Los frentes de onda y los rayos son visualizaciones que nos ayudan en la comprensión de la realidad, algo que las ciencias físicas hacen de forma característica mediante el establecimiento de modelos. ¿En qué se diferencia la metodología empleada por las ciencias naturales de la empleada por las ciencias humanas?

Denominamos **ciencias humanas** al estudio de la totalidad de aspectos que abarca la interacción entre los seres humanos y la interacción de estos con el mundo que les rodea. El propósito de las ciencias humanas es el mismo que el de las ciencias naturales, la búsqueda de la objetividad y de la verdad, pero la **metodología** suele ser necesariamente distinta. Los modelos visuales simples (como el frente de ondas) y los modelos matemáticos (como la ecuación de onda), que desempeñan un papel tan importante en el estudio de la física, no son fácilmente aplicables a la complejidad de la existencia humana. Además, las ciencias **empíricas** se basan en la experimentación repetida y controlada, algo que a menudo resulta inapropiado en las ciencias humanas.

Amplitud e intensidad

La cantidad de energía asociada a una onda está relacionada con su amplitud. Las ondas con amplitudes mayores transfieren más energía. Las circunferencias de los frentes de onda circulares se hacen mayores a medida que se desplazan desde una fuente puntual, de manera que una misma cantidad de energía se tiene que propagar a lo largo de una longitud mayor. Como consecuencia, la amplitud de la onda disminuye (véanse Figuras 4.28 y 4.32). Este fenómeno también ocurre en el caso de frentes de onda esféricos que se propagan en tres dimensiones, como la propagación de la luz, el sonido o las ondas de radio.

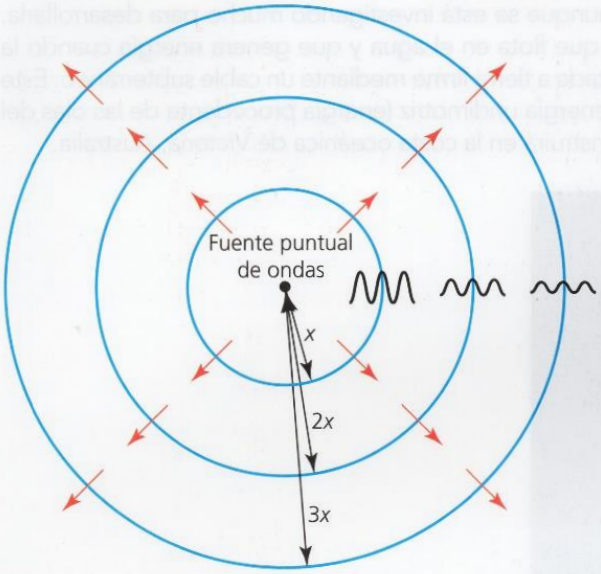


Figura 4.32
La amplitud de los frentes de onda circulares disminuye conforme aumenta la distancia a la fuente

Llegados a este punto resulta útil introducir el concepto de **intensidad** de una onda:

La intensidad, I, se define como la potencia transmitida perpendicularmente por la onda por unidad de superficie.

$$\text{intensidad, } I, = \frac{\text{potencia}}{\text{superficie}}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física* (para el Tema 8).

La unidad para la intensidad es $W\,m^{-2}$.

La intensidad de la onda disminuye claramente a medida que aumenta la distancia a la que se encuentra la fuente puntual y debe estar asociada a la amplitud de la onda.

En general la intensidad de una onda es proporcional a su amplitud al cuadrado:

$$I \propto A^2$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*. Observa que estamos utilizando el símbolo A como símbolo generalizado para la amplitud (en lugar de x_0).

Ejemplos resueltos

5 La intensidad de onda que llega a una determinada ubicación de la superficie terrestre en un día soleado puede ser en promedio de unos $600\,W\,m^{-2}$.
a Calcula la potencia media que incide perpendicularmente sobre un panel solar cuya superficie es $1{,}50\,m^2$.
b ¿Cuánta energía puede incidir sobre el panel en seis horas?
c Discute cómo puede variar la intensidad incidente sobre el panel si lo desplazamos hasta una montaña cercana.

a potencia, P, = intensidad × superficie = 600 × 1,5 = 900 W

b energía = Pt = 900 × 6 × 3600 = 19,4 MJ

c El cambio en la distancia entre el panel solar y el Sol es totalmente insignificante, pero si el panel está en lo alto de una montaña, tendrá menos atmósfera terrestre sobre él y, en consecuencia, probablemente recibirá una mayor intensidad incidente.

6 Las olas oceánicas que llegan a una playa tienen una amplitud de 2,0 m y una potencia media de $5{,}2 \times 10^4$ W por cada metro de su longitud.
a Estima qué potencia por metro transferirían si su amplitud se redujera a 1,3 m.
b ¿Qué amplitud produciría una potencia total de 10 MW que llegara a una playa de longitud 1,0 km?
c ¿De dónde obtienen su energía las ondas oceánicas?

a $\frac{I}{A^2}$ = constante

$$\frac{(5{,}2 \times 10^4)}{2{,}0^2} = \frac{I}{1{,}3^2}$$

$I = 2{,}2 \times 10^4$ W

b $10\,\text{MW km}^{-1}$ es igual a $\frac{1{,}0 \times 10^7}{10^3} = 1{,}0 \times 10^4\,\text{W m}^{-1}$

$\frac{I}{A^2}$ = constante

$\frac{5{,}2 \times 10^4}{2{,}0^2} = \frac{1{,}0 \times 10^4}{A^2}$

$A = 0{,}88\,\text{m}$

c Del viento, que a su vez la obtiene del Sol.

Las olas oceánicas transfieren una enorme cantidad de energía. La tecnología para transformar esta energía en electricidad útil es complicada y cara, aunque se está investigando mucho para desarrollarla. En la Figura 4.33 podemos ver una enorme boya que flota en el agua y que genera energía cuando la atraviesan las olas. La energía obtenida es transportada a tierra firme mediante un cable subterráneo. Este tipo de tecnología se utilizará en el generador de energía undimotriz (energía procedente de las olas del mar) más grande del mundo (62,5 MW), que se construirá en la costa oceánica de Victoria, Australia.

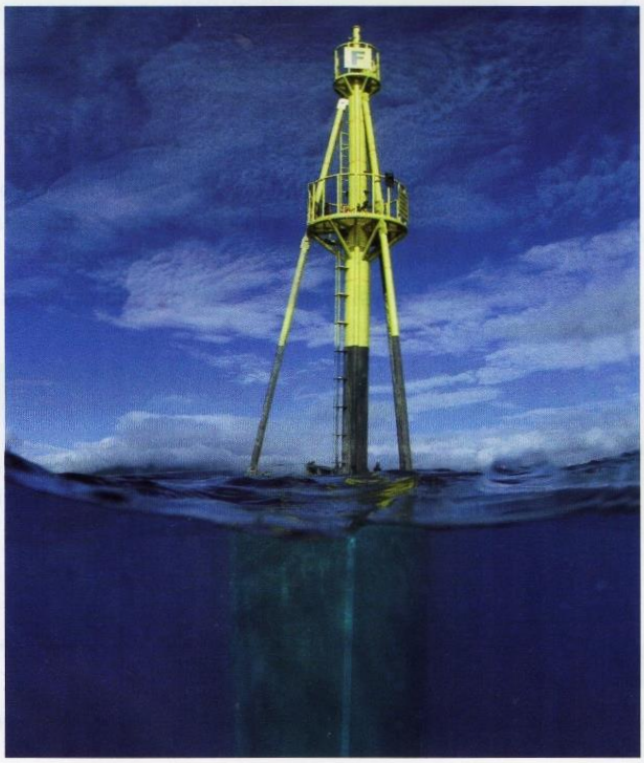


Figura 4.33
Generador de energía undimotriz

Ley del inverso del cuadrado de la distancia

La intensidad, I, de una onda que se desplaza desde una fuente puntual uniformemente en tres dimensiones, sin pérdida de energía, es inversamente proporcional a la distancia respecto a la fuente, x, al cuadrado.

$$I \propto \frac{1}{x^2}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

De forma alternativa podemos escribir Ix^2 = constante para ondas que se propagan desde una fuente dada.

Las relaciones que van con el inverso del cuadrado desempeñan un importante papel en física. Como ocurre con las ondas, un campo de fuerza (por ejemplo, la gravedad) que se propaga uniformemente en todas direcciones desde un punto, obedece una ley del inverso del cuadrado de la distancia.

Consideremos la luz irradiada por una fuente puntual en el caso de que no haya absorción (véase Figura 4.34). Cuanto más nos alejamos de la fuente mayor es la superficie que debe cubrir la luz y por tanto esta se vuelve más tenue. La cantidad de luz que incide sobre cada unidad de superficie disminuye con el cuadrado de la distancia. Esto es así porque cuando nos alejamos el doble de la distancia a la fuente, la luz tiene que difundirse para cubrir cuatro veces la superficie; cuando nos alejamos tres veces la distancia a la fuente, la luz tiene que cubrir nueve veces la superficie, y así sucesivamente.

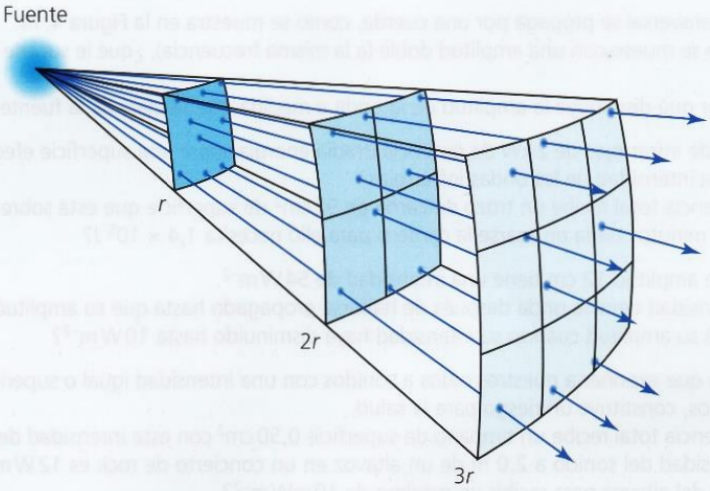


Figura 4.34
La luz se difunde para cubrir cuatro veces la superficie cuando está a dos veces la distancia de la fuente (2r) y nueve veces la superficie cuando está a tres veces la distancia (3r)

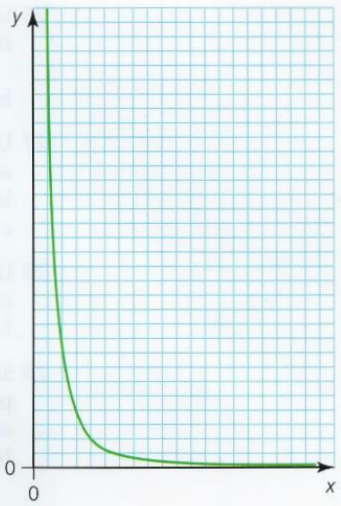


Figura 4.35
Una relación que va con el inverso del cuadrado de la distancia

Tabla 4.2
¿Son y y x^2 inversamente proporcionales?

x	y
1,34	8,8
0,96	17
0,81	24
0,70	32
0,64	38
0,59	45
0,55	52
0,52	59
0,49	66

Consideremos los datos de x e y que se muestran en la Tabla 4.2. Si $y \propto 1/x^2$, entonces x^2y = constante.

Es importante saber el aspecto que tiene gráficamente una relación que va con el inverso del cuadrado de la distancia. Si representamos gráficamente los datos de la Tabla 4.2 mediante y en el eje vertical y x en el horizontal, la forma de la curva sería similar a la de la Figura 4.35. Observa que la curva no intersecta con los ejes. Sin embargo, al contrario no es tan simple: a partir de una gráfica como esta no podemos concluir con seguridad que estamos ante una relación que va con el inverso del cuadrado de la distancia sin hacer un estudio más exhaustivo.

Ejemplo resuelto

7 Una familia está preocupada porque una compañía telefónica va a instalar una antena de transmisión de telefonía móvil (una *estación* base) a 100 m de su casa. Han leído que se recomienda que la máxima intensidad recibida sea $4{,}5\,W\,m^{-2}$.

a Si la intensidad a 1 m de la antena de la estación base es $3{,}0\,W\,m^{-2}$, calcula la intensidad aproximada cerca de su casa.

b ¿Por qué la respuesta anterior es tan solo una estimación?

c Compara tu respuesta al apartado **a** con la intensidad recibida desde un teléfono móvil situado a 5 cm de tu cabeza, suponiendo que la potencia a 1 cm de la antena de transmisión del teléfono (situada en su interior) es 50 mW.

a Ix^2 = constante

$3{,}0 \times 1^2 = I \times 100^2$

$I = 3{,}0 \times 10^{-4}\,W\,m^{-2}$

b Las antenas están diseñadas para enviar las señales en unas direcciones determinadas, no en todas las direcciones por igual (tal como se supone cuando se utiliza la ley del cuadrado de la distancia). La intensidad real recibida también depende de lo que hay entre la casa y la antena.

c $50 \times 1^2 = I \times 5^2$

I = 2mW, que es mayor que la de la respuesta al apartado **a**.

26 Una onda transversal se propaga por una cuerda, como se muestra en la Figura 4.14.
- **a** Si la mano se mueve con una amplitud doble (a la misma frecuencia), ¿qué le sucede a la potencia transmitida a las ondas?
- **b** Explica por qué disminuye la amplitud de la onda a medida que se aleja de la fuente.

27 Una parrilla de infrarrojos de 2 kW de potencia irradia energía sobre una superficie efectiva de 500 cm^2.
- **a** ¿Cuál es la intensidad de las ondas infrarrojas?
- **b** ¿Qué potencia total recibe un trozo de carne de 92 cm^2 de superficie que está sobre la parrilla?
- **c** ¿Cuántos minutos tarda en asarse la carne si para ello necesita $1{,}4 \times 10^5$ J?

28 Una onda de amplitud 12 cm tiene una intensidad de 54 $W m^{-2}$.
- **a** ¿Qué intensidad tiene la onda después de haberse propagado hasta que su amplitud se ha reducido a 7,0 cm?
- **b** ¿Cuál será su amplitud cuando su intensidad haya disminuido hasta 10 $W m^{-2}$?

29 Se considera que exponer a nuestros oídos a sonidos con una intensidad igual o superior a 10 $mW m^{-2}$ durante unos pocos minutos, constituye un riesgo para la salud.
- **a** ¿Qué potencia total recibe un tímpano de superficie 0,50 cm^2 con esta intensidad de sonido?
- **b** Si la intensidad del sonido a 2,0 m de un altavoz en un concierto de rock es 12 $W m^{-2}$, ¿a qué distancia te tienes que alejar del altavoz para recibir un máximo de 10 $mW m^{-2}$?

30 Una persona se encuentra a 1,0 m de una fuente de radiación gamma.
- **a** ¿A qué distancia se tiene que alejar la persona para que la intensidad de radiación recibida se reduzca en un 99%?
- **b** ¿Qué supuestos has tenido en cuenta para responder al apartado **a**?

31 Investiga cuáles son los últimos datos sobre el desarrollo de la producción de electricidad a partir de las ondas oceánicas.

32 Una central eléctrica situada a la orilla del mar transforma la energía undimotriz (energía procedente de las olas del mar) en electricidad a una tasa de 50 kW por día, cuando la amplitud media de las olas es de 1,2 m.
- **a** Estima la potencia de salida cuando la amplitud de la ola se duplica.
- **b** ¿Qué supuestos has tenido en cuenta?
- **c** ¿Qué amplitud de las olas cabe esperar que produzca una potencia de 150 kW?
- **d** ¿Qué potencia pueden transmitir las olas de 1,0 m de amplitud?

33 Utiliza una hoja de cálculo para calcular valores de x^2, $1/x^2$ y x^2y con los datos de la Tabla 4.2. Son x^2 e y inversamente proporcionales?

34 Otra manera de saber si existe una relación entre dos conjuntos de datos es representándolos gráficamente de la manera conveniente para ver si la gráfica es una línea recta. Utiliza los valores que has calculado en la pregunta **33** para dibujar una gráfica de y con respecto a $1/x^2$. ¿Tiene la gráfica el aspecto de una recta que pasa por el origen (lo cual confirmaría la proporcionalidad inversa)?

Superposición

Ahora centraremos nuestra atención en lo que sucede cuando se encuentran frentes de onda procedentes de distintos lugares. En general el principio de **superposición** nos permite predecir lo que sucederá cuando se encuentran las ondas.

El principio de superposición afirma que en cualquier instante de tiempo el desplazamiento total de cualquier punto equivale a la suma vectorial de todos los desplazamientos de onda individuales.

Este principio se ilustra en la Figura 4.36. Si la onda A y la onda B se encuentran en un determinado punto, la perturbación resultante viene dada en cada instante de tiempo por la suma de los desplazamientos individuales en ese instante.

En este ejemplo las ondas A y B tienen frecuencias distintas, pero en el resto de este aparado solo tendremos en cuenta la combinación de dos ondas con la misma frecuencia.



La suma de dos (o más) ondas para obtener la onda resultante es una tarea fácil para un ordenador. La modelización por ordenador de los efectos de superposición de ondas puede ser especialmente instructiva porque se pueden ajustar fácilmente las amplitudes y las frecuencias de las ondas implicadas, y observar a continuación las consecuencias de estos ajustes. En cambio, la observación en el laboratorio de la superposición momentánea de ondas (que viajan en sentido contrario) que se cruzan no es tan fácil.

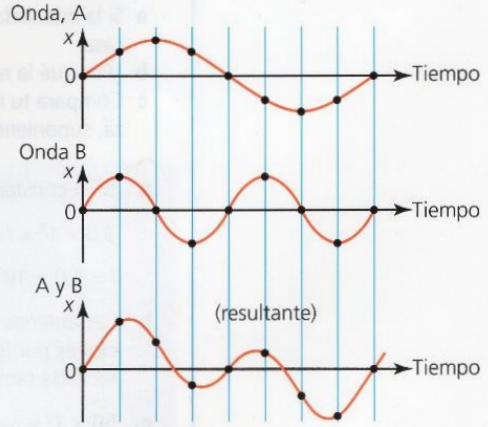
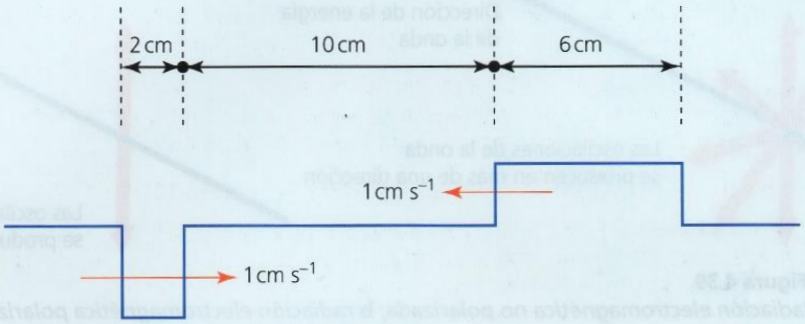


Figura 4.36
Suma de los desplazamientos de las ondas mediante el principio de superposición

En el apartado 5 de este capítulo utilizaremos el principio de superposición para explicar los modelos de interferencia estacionaria.

35 **a** Esboza una gráfica desplazamiento – tiempo para una duración de 1 s de una oscilación sinusoidal de amplitud 4 cm y frecuencia 2 Hz.
b Dibuja sobre los mismos ejes una curva que represente una oscilación de amplitud 2 cm y frecuencia 4 Hz.
c Utiliza el principio de superposición para dibujar esquemáticamente la resultante de estas dos ondas.

36 En la Figura 4.37 se representan dos pulsos cuadrados idénticos ideales que se desplazan uno hacia el otro. Dibuja el frente de onda resultante al cabo de:
a 6 s
b 7 s
c 8,5 s
d 10 s.

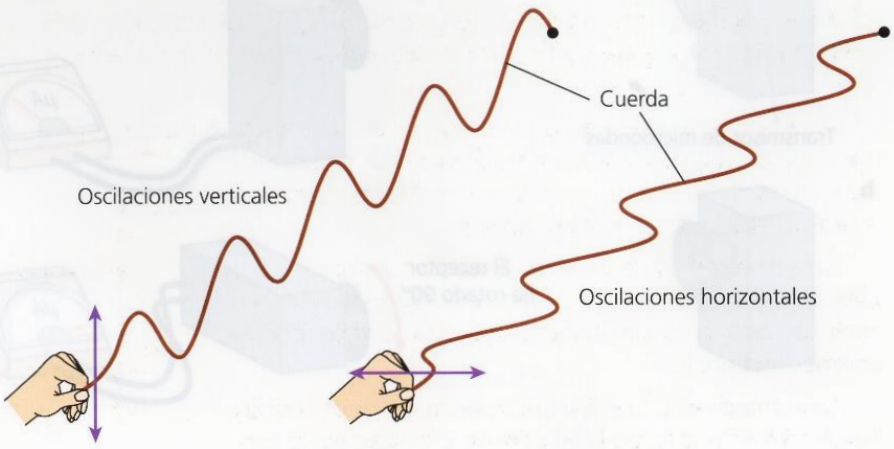


■ **Figura 4.37**

37 Dos ondas sinusoidales (A y B) procedentes de distintas fuentes tienen la misma frecuencia y atraviesan un determinado punto P, al mismo tiempo y con la misma amplitud.
a Esboza las formas de ambas ondas sobre una gráfica desplazamiento – tiempo suponiendo que las ondas llegan en fase, y a continuación dibuja la forma de onda resultante.
b Repite el proceso para dos ondas que llegan a P en contrafase.

■ Polarización

Consideremos el ejemplo de la transmisión de ondas transversales a través de una cuerda. Si nuestra mano solo oscila verticalmente, la cuerda solo oscilará verticalmente. En este caso se dice que la onda está **polarizada en un plano** porque solo oscila en un plano (vertical), tal como se muestra en la Figura 4.38. Si nuestra mano solo oscila horizontalmente generará una onda polarizada en un plano horizontal.



■ **Figura 4.38**
Ondas transversales a través de una cuerda

Una onda transversal está polarizada en un plano si todas las oscilaciones que transmiten la energía de la onda se producen en el mismo plano (denominado **plano de polarización**).

Las oscilaciones de la onda polarizada deben ser perpendiculares a la dirección de desplazamiento de la onda, de manera que es imposible que las ondas longitudinales, como el sonido, estén polarizadas.

Luz polarizada y otras ondas electromagnéticas

Consideremos de nuevo la Figura 4.23, en la que se representa la naturaleza de las ondas electromagnéticas. En este ejemplo, las ondas se desplazan hacia la derecha, las oscilaciones del campo eléctrico se producen en el plano horizontal y las del campo magnético en el plano vertical, pero las oscilaciones de ondas no polarizadas pueden producirse en cualquier plano perpendicular a la dirección de desplazamiento de la onda (mientras que las de los campos eléctrico y magnético son perpendiculares entre sí).

Las ondas electromagnéticas, entre las que se encuentra la luz, se emiten principalmente durante procesos aleatorios e impredecibles, de manera que lo que cabe esperar es que oscilen en direcciones aleatorias y no que estén polarizadas (véase Figura 4.39a).

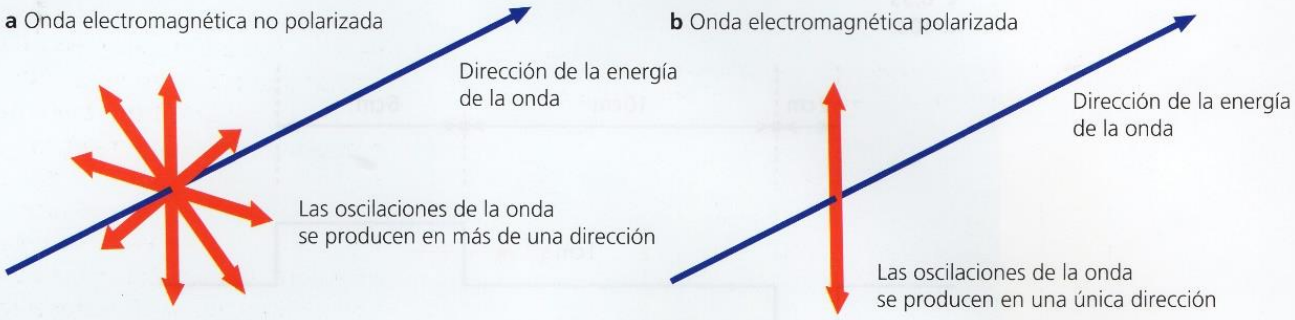


Figura 4.39
a *Radiación electromagnética no polarizada;* **b** *radiación electromagnética polarizada*

Decimos que una onda electromagnética (como la luz) está polarizada (en un plano) cuando todas las oscilaciones del campo eléctrico (o del campo magnético) se producen en un único plano, tal como se muestra en la Figura 4.39b.

Las ondas electromagnéticas generadas y trasmitidas por corrientes que oscilan en antenas (ondas de radio y microondas) están polarizadas, y las oscilaciones de los campos eléctricos son paralelas a la señal de transmisión de la antena.

En la Figura 4.40 se representa la transmisión y recepción de microondas. En la Figura 4.40a la señal que se recibe es intensa porque las antenas de transmisión y de recepción están alineadas; en cambio, en la Figura 4.40b no se recibe señal porque la antena de recepción se ha rotado un ángulo de 90°.

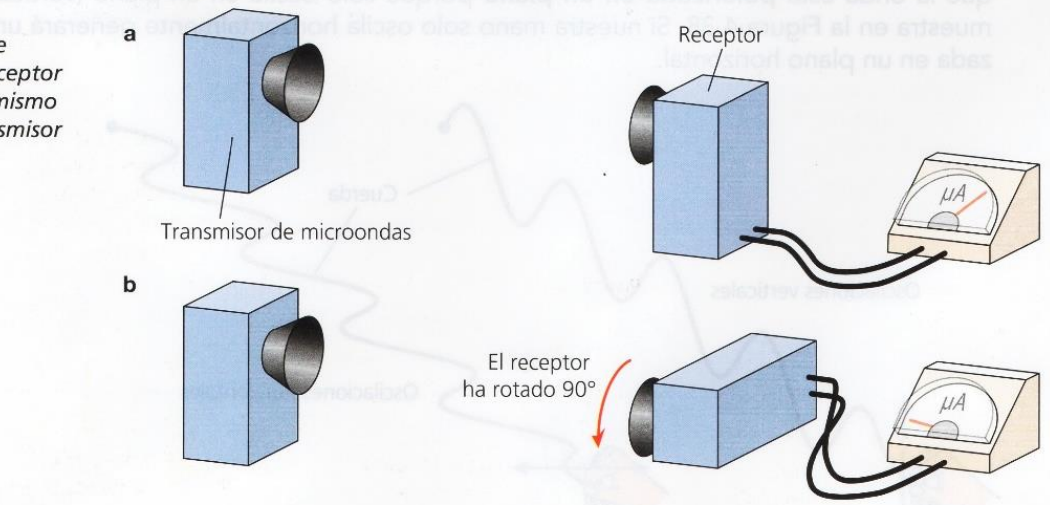


Figura 4.40
En la detección de microondas, el receptor debe estar en el mismo plano que el transmisor

Polarización por absorción

La luz no polarizada se puede polarizar haciéndola pasar por un filtro especial denominado **polarizador**, que absorbe las oscilaciones que se producen en todos los planos menos en uno.

Los **filtros polarizadores** para luz se fabrican con materiales constituidos por largas cadenas de moléculas que están mayoritariamente alineadas en una determinada dirección. La componente del campo eléctrico paralela a la cadena de moléculas es absorbida, mientras que la componente perpendicular a la cadena es transmitida. Por tanto, cabe esperar que la intensidad transmitida sea

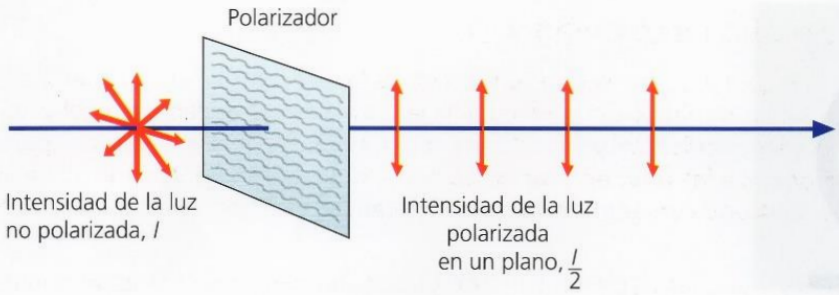


Figura 4.41
Polarizando luz por medio de un polarizador

del orden de la mitad de la intensidad incidente, como se muestra en la Figura 4.41.

Para comprender este proceso puede ser útil considerar el comportamiento de las ondas transversales generadas por la oscilación de una cuerda (como se muestra en la Figura 4.38) al atravesar una rendija vertical (véase Figura 4.42). Las ondas que oscilan de forma paralela a la rendija la atravesarán, mientras que las demás quedarán bloqueadas. La rendija actúa como un polarizador.

¿Qué sucede si la luz polarizada incide a continuación sobre un segundo filtro polarizador? La respuesta depende de la alineación de ambos filtros. Si el segundo filtro (a veces denominado analizador) transmite ondas en el mismo plano que el primero (el polarizador), las ondas lo atraviesan sin resultar afectadas, aparte de una posible disminución (ligera) de la intensidad. En este caso se dice que los filtros están en paralelo, como los de la Figura 4.43b. En la Figura 4.43a se representa la situación en la que el analizador solo permite el paso de ondas a través de un plano que forma un ángulo recto con el plano de las ondas transmitidas por el polarizador. En este caso se dice que los filtros están «cruzados» y el analizador no transmite luz. (Véase también la Figura 4.44).

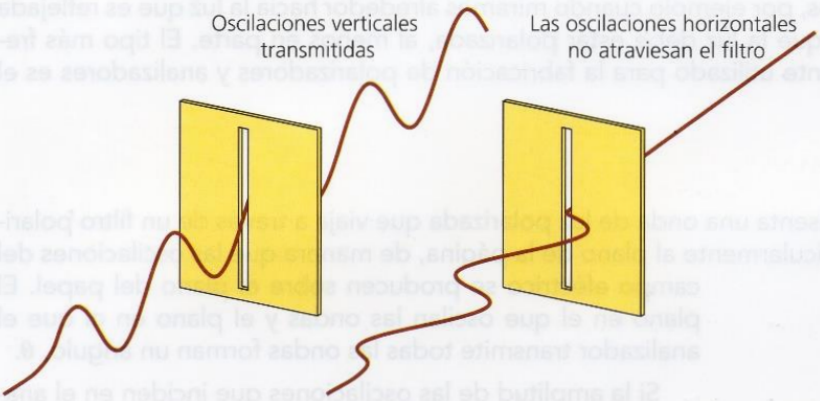
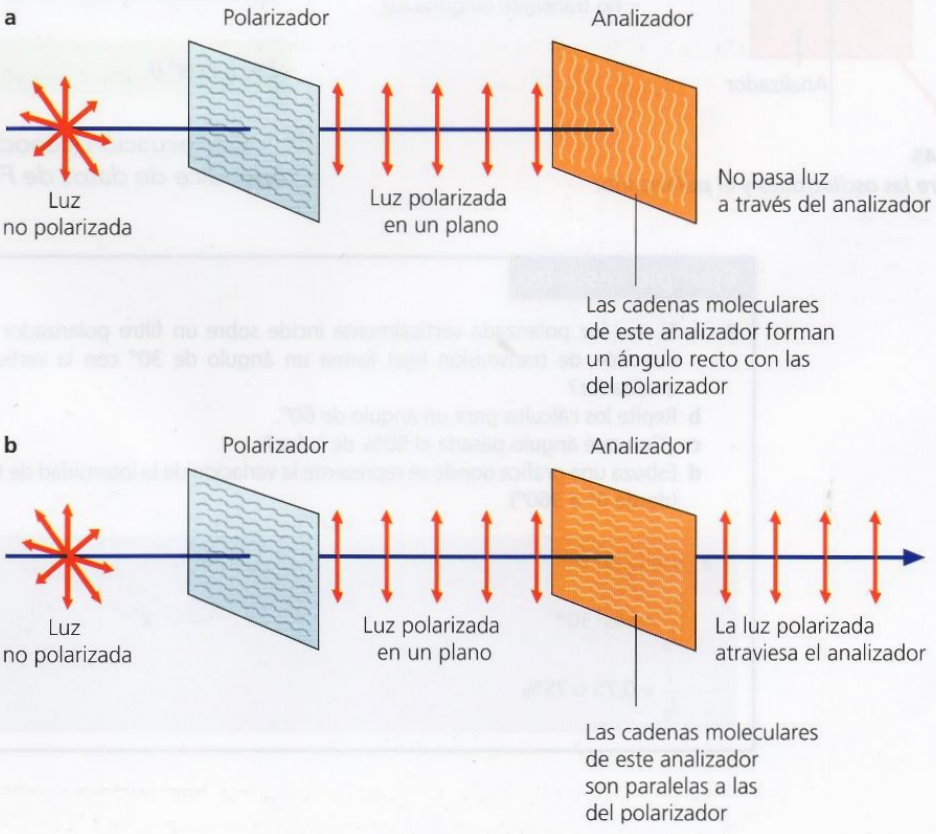


Figura 4.42
Una rendija vertical actúa como un filtro polarizador

Figura 4.43
Polarizador y analizador: **a** *cruzados;* **b** *en paralelo*



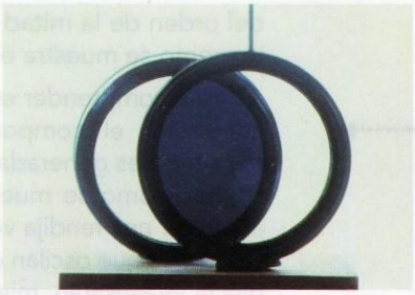


Figura 4.44
Filtros polarizadores cruzados

El segundo filtro se denomina **analizador** porque se puede rotar para analizar la luz y determinar si está polarizada y, si lo está, en qué dirección.

Si observamos un cambio en la intensidad de la luz cuando rotamos un filtro polarizador colocado delante de nuestros ojos, por ejemplo cuando miramos alrededor hacia la luz que es reflejada por diversos objetos, es porque la luz debe estar polarizada, al menos en parte. El tipo más frecuente de plástico transparente utilizado para la fabricación de polarizadores y analizadores es el **Polaroid®**.

Ley de Malus

En la Figura 4.45 se representa una onda de luz polarizada que viaja a través de un filtro polarizador (analizador) y perpendicularmente al plano de la página, de manera que las oscilaciones del campo eléctrico se producen sobre el plano del papel. El plano en el que oscilan las ondas y el plano en el que el analizador transmite todas las ondas forman un ángulo, θ.

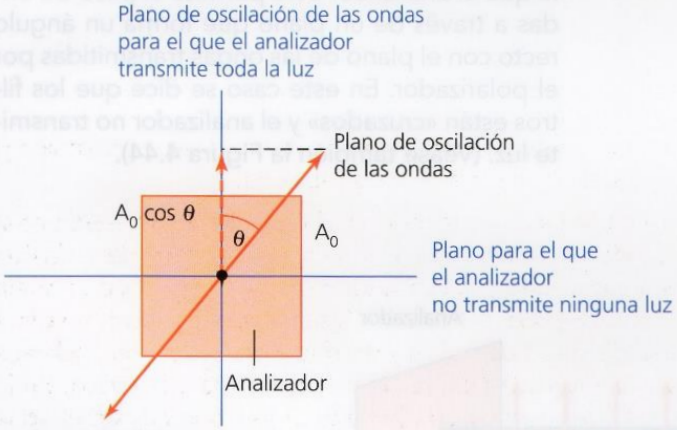


Figura 4.45
Ángulo entre las oscilaciones y el polarizador

Si la amplitud de las oscilaciones que inciden en el analizador es A_0, la componente en la dirección en que pueden transmitirse las ondas es $A_0 \cos \theta$.

Al principio del capítulo estudiamos que la intensidad de las ondas es proporcional a su amplitud elevada al cuadrado, $I \propto A^2$; por tanto, la intensidad transmitida se puede representar mediante la ecuación:

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

Esta ecuación (conocida como **ley de Malus**) figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Ejemplo resuelto

8 **a** Si una luz polarizada verticalmente incide sobre un filtro polarizador (analizador) situado de manera que su dirección de transmisión (eje) forma un ángulo de 30° con la vertical, ¿qué porcentaje de luz atraviesa el analizador?

b Repite los cálculos para un ángulo de 60°.

c ¿Con qué ángulo pasaría el 50% de la luz?

d Esboza una gráfica donde se represente la variación de la intensidad de transmisión con la rotación del analizador (desde 0° a 360°).

a $I = I_0 \cos^2 \theta$

$$\frac{I}{I_0} = \cos^2 30°$$

$$\frac{I}{I_0} = 0{,}75 \text{ o } 75\%$$

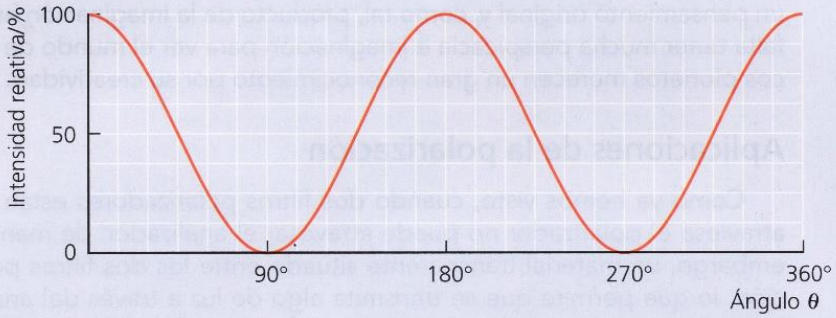
b $\frac{I}{I_0} = \cos^2 60° = 0{,}25$ o 25%

c $\frac{I}{I_0} = 0{,}50 = \cos^2\theta$

$\cos\theta = \sqrt{0{,}50} = 0{,}71$

$\theta = 45°$

d Véase la Figura 4.46. En esta gráfica se representa la variación de la intensidad transmitida a través de un filtro polarizador respecto al ángulo.



■ **Figura 4.46**

Polarización por reflexión

Cuando la luz (no polarizada) se refleja en un material aislante, las ondas se pueden polarizar y, en ese caso, el plano de polarización será paralelo a la superficie de reflexión.

El ejemplo más frecuente de polarización por reflexión es la reflexión de la luz en agua y en cristal. Este tipo de reflexión suele ser indeseada y la cantidad de luz reflejada (que se suele llamar «reflejo») que entra en los ojos se puede reducir mediante el uso de *gafas de sol polarizadas* (*Polaroid®*), que además reducen la intensidad de la luz no polarizada a la mitad. En la Figura 4.47 se muestra un ejemplo. El pez que hay en el agua se puede ver claramente cuando se utilizan gafas de sol (*Polaroid®*). Estas reducen de forma importante la cantidad de luz reflejada por la superficie del agua que entra en los ojos. Esta reducción, sin embargo, no es la misma para todos los ángulos de visión porque la polarización depende del ángulo de incidencia. Los fotógrafos colocan un filtro polarizador giratorio sobre la lente de la cámara para reducir la intensidad de la luz reflejada.



■ **Figura 4.47**
La misma escena con y sin Polaroid®

38 ¿Cómo podrías comprobar rápidamente si unas gafas de sol son Polaroid®?

39 Un haz de luz polarizada en un plano atraviesa un analizador cuyo eje de transmisión forma un ángulo de 75° con el plano de polarización. ¿Qué porcentaje de la luz incidente emerge?

40 Cuando un haz de luz no polarizada atraviesa dos filtros polarizadores solo emerge un 20% de la luz incidente. ¿Cuál es el ángulo que forman los ejes de transmisión de ambos filtros?

41 Sugiere por qué la luz azul del cielo en un día claro y soleado está parcialmente polarizada.

42 Utiliza Internet para obtener información sobre los microscopios de luz polarizada y sus aplicaciones.

Naturaleza de la ciencia

La polarización como fuente de inspiración

El espato de Islandia, una forma cristalina transparente de un mineral llamado calcita, puede polarizar parcialmente la luz. Esta propiedad despertó la imaginación de los primeros científicos que investigaron las propiedades de la luz. La capacidad polarizadora del espato de Islandia fue descrita por primera vez hace casi 350 años por Bartholinus, en 1669, pero se cree que casi 1000 años antes, los vikingos ya utilizaban este mineral como herramienta de navegación porque su efecto sobre los rayos de luz solar se puede utilizar para determinar la posición del Sol, incluso si el cielo está nublado.

Cuando una teoría científica, como la polarización, ha sido aceptada y utilizada durante un largo periodo de tiempo se tiende a subestimarla. Es fácil olvidar que, cuando se introdujo, fue fruto de un pensamiento original y, como tal, producto de la imaginación humana e incluso del genio. Hace falta tener mucha perspicacia e imaginación para ver el mundo de una forma distinta, y los científicos pioneros merecen un gran reconocimiento por su creatividad.

Aplicaciones de la polarización

Como ya hemos visto, cuando dos filtros polarizadores están cruzados, la luz polarizada que atraviesa el polarizador no puede atravesar el analizador, de manera que no se transmite luz. Sin embargo, un material transparente situado entre los dos filtros puede rotar el plano de polarización, lo que permite que se transmita algo de luz a través del analizador. Un material que puede rotar el plano de polarización de las ondas de luz que lo atraviesan es un material **ópticamente activo**.

En la Figura 4.48 se representa una disolución de azúcar (ópticamente activa) situada entre dos filtros polarizadores. La concentración de la disolución de azúcar puede ser determinada a partir de la magnitud de la rotación.

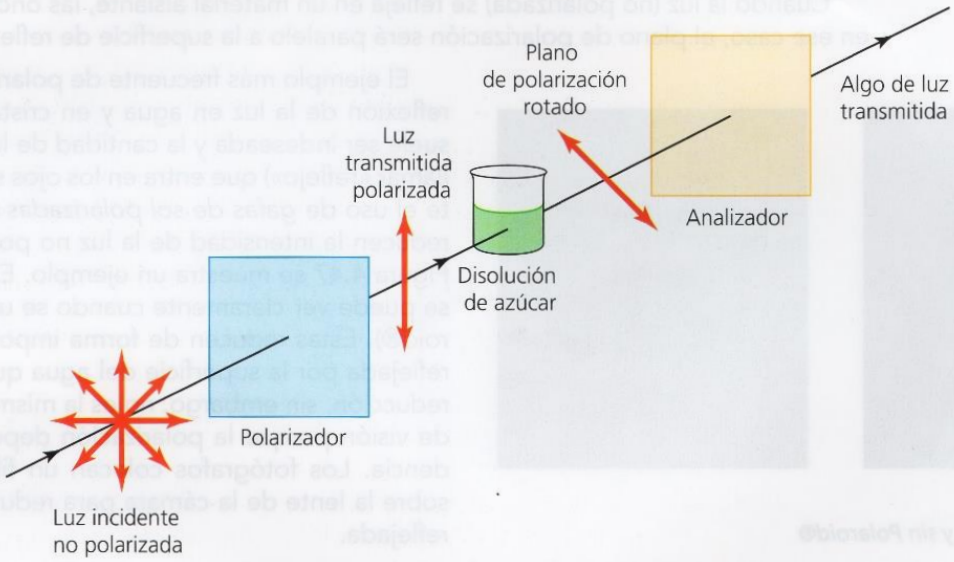


Figura 4.48
Rotación del plano de polarización mediante una disolución de azúcar

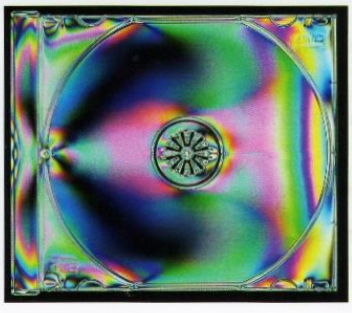


Figura 4.49
Concentración de esfuerzos en una caja de DVD vista con luz polarizada

Cuando están sometidos a esfuerzos, algunos plásticos y cristales se convierten en ópticamente activos y rotan el plano de polarización (véase Figura 4.49). Esta propiedad les puede resultar de utilidad a los ingenieros para la determinación de las posibles concentraciones de esfuerzos de un modelo de estructura antes de su construcción.

Pantallas de cristal líquido (LCD)

El **cristal líquido** es un estado de la materia cuyas propiedades se encuentran entre las de un líquido y las de un sólido (cristal). Y lo que es más interesante, la capacidad de rotación del plano de polarización que poseen algunos tipos de cristal líquido se puede modificar aplicándoles una pequeña diferencia de potencial, de manera que sus moléculas se orienten en la dirección del campo eléctrico.

En la Figura 4.50 se representa una disposición simplificada. Si no hay diferencia de potencial (d.p.) a través del cristal líquido el analizador no transmite luz.

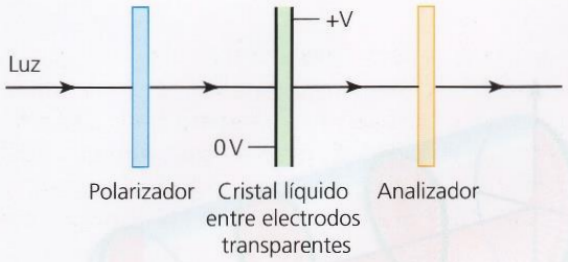


Figura 4.50
Disposición de los elementos de una pantalla de cristal líquido

Cuando se aplica una d.p. a un cristal líquido, sus moléculas se reorientan para alinearse con el campo eléctrico y el plano de polarización rota de manera que se transmite parte de la luz o su totalidad. El grado de rotación del plano de polarización y la cantidad de luz transmitida dependen de la magnitud de la d.p.

En las pantallas simples (como las de muchas calculadoras y relojes digitales), la luz que entra por la pantalla atraviesa los cristales líquidos y es reflejada de nuevo hacia el observador. Cada segmento de la pantalla aparece oscuro o iluminado en función de si se le ha aplicado o no una d.p. al cristal líquido (véase Figura 4.51).

La imagen de las pantallas de muchos ordenadores, teléfonos móviles y televisores está compuesta por unos elementos minúsculos denominados píxeles que están compuestos, a su vez, de un gran número de cristales líquidos. Los colores se crean mediante el uso de filtros, y la luz proviene de una lámpara fluorescente o de LED situada detrás de la pantalla.

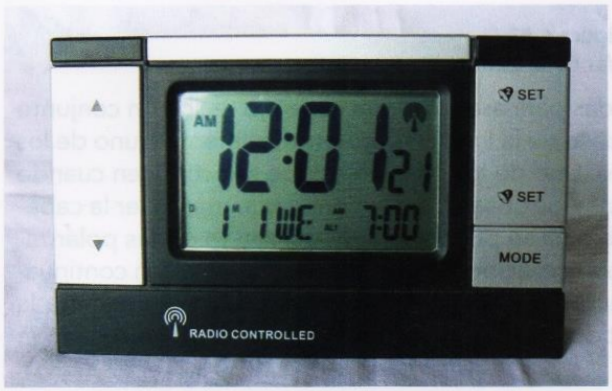


Figura 4.51
Pantalla de cristal líquido compuesta por siete segmentos

43 Un haz de luz no polarizada de intensidad 48 mW incide sobre dos filtros polarizadores cuyos ejes de transmisión forman un ángulo de 20°.
- **a** ¿Qué intensidad entra en el segundo filtro?
- **b** ¿Qué intensidad emerge del segundo filtro?
- **c** Si colocamos una disolución de azúcar entre los filtros, el plano de polarización rota 28°. ¿Qué intensidad emerge en ese caso del segundo filtro?

44 Utiliza internet para investigar y comparar las principales ventajas y desventajas del uso de pantallas de cristal líquido y de LED.

Aplicación

Polarización y cine en 3-D

Nuestros ojos y nuestro cerebro ven objetos en tres dimensiones (3-D) porque cuando ambos ojos miran un mismo objeto, cada uno de ellos recibe una imagen ligeramente distinta. Este fenómeno se denomina *visión estereoscópica* y se produce porque nuestros ojos no están situados exactamente en la misma posición. El cerebro mezcla ambas imágenes para dar la impresión de tres dimensiones o «profundidad». Sin embargo, cuando miramos una imagen bidimensional en un libro o sobre una pantalla ambos ojos reciben esencialmente la misma imagen.

Si queremos crear una imagen 3-D a partir de una pantalla plana tenemos que proporcionarle a cada ojo una imagen distinta, algo que podemos hacer gracias a la luz polarizada. (Antiguamente se empleaban otros sistemas menos efectivos, como los filtros con distintos colores). En los sistemas modernos, más simples, se toman imágenes con una cámara y se proyectan en la pantalla en forma de ondas polarizadas verticalmente. Simultáneamente se toman imágenes con una segunda cámara situada cerca de la primera y se proyectan en forma de ondas polarizadas horizontalmente. A veces se puede generar la segunda imagen mediante un programa de ordenador (en lugar de una segunda cámara) para proporcionar un efecto 3-D.



Figura 4.52
Uso de gafas polarizadas para visionar una película en 3-D

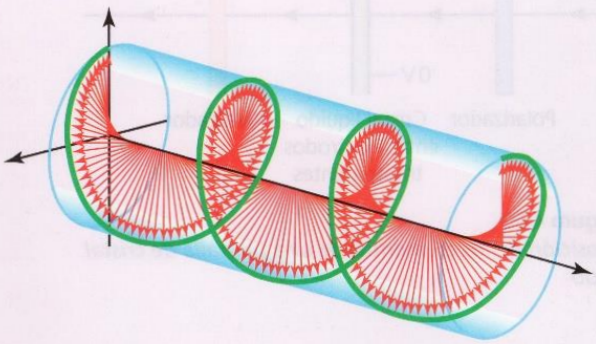


Figura 4.53
Ondas polarizadas circularmente

El observador se pone unas gafas polarizadas para asegurar que cada ojo recibe un conjunto de imágenes distintas. Las gafas permiten el paso de la luz polarizada verticalmente a uno de los ojos y la luz polarizada horizontalmente al otro. Uno de los problemas que se producen cuando se utilizan ondas polarizadas en un plano, es que los observadores tienen que mantener la cabeza en un mismo plano, sin inclinarla. Este problema se puede superar utilizando ondas polarizadas circularmente, en las que la dirección de las oscilaciones del campo eléctrico rotan continuamente en círculos, como se muestra en la Figura 4.53. Un proyector simple envía imágenes a la pantalla alternando la polarización en el sentido de las agujas del reloj, con la polarización en sentido contrario a las agujas del reloj.

1 Consulta Internet para obtener información sobre las últimas novedades en las técnicas de televisión en 3-D.

4.4 Comportamiento de las ondas

Las ondas interactúan con el medio y con otras ondas de varias maneras que pueden llegar a ser inesperadas y útiles

La forma y/o la dirección del desplazamiento de una onda pueden verse modificadas por los cambios en la velocidad de la onda, o bien, por los obstáculos que puedan aparecer en su trayectoria. Estos efectos se denominan **reflexión**, **refracción** y **difracción**. Asimismo, cuando las ondas se combinan se produce una **interferencia**. En este apartado estudiaremos cada una de estas cuatro propiedades.

Reflexión y refracción

Reflexión

Cuando una onda llega a una *frontera* entre dos medios distintos, normalmente una parte de las ondas o su totalidad se reflejan. En determinadas circunstancias algunas ondas pueden atravesar el segundo medio (y entonces decimos que se ha producido una cierta **transmisión** de las ondas). Un ejemplo claro podría ser el de las ondas de luz que atraviesan un material **transparente**, por ejemplo un líquido o diversos tipos de cristales. En la Figura 4.54 se puede ver tanto el efecto de reflexión como el de transmisión en una misma ventana.

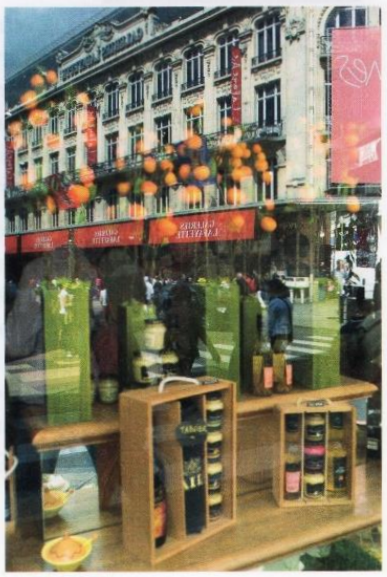


Figura 4.54
Luz reflejada y luz transmitida por una ventana

Para seguir entendiendo el concepto de reflexión volvamos a considerar los dos modelos de onda con los que ya hemos trabajado anteriormente, las ondas producidas en una cuerda y las ondas producidas en agua.

Reflexión en una dimensión



En la Figura 4.55 se representa un pulso simple, producido en una cuerda o en un muelle que se desplaza hacia una frontera fija donde es totalmente reflejado sin pérdida de energía. Observa que la onda reflejada está invertida. En este caso decimos que la onda ha experimentado un cambio de fase de media longitud de onda.

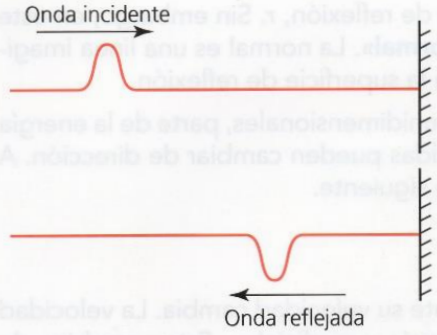


Figura 4.55
Reflexión de un pulso sobre una frontera fija

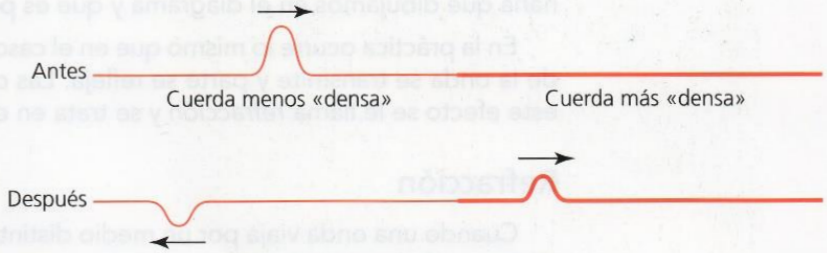


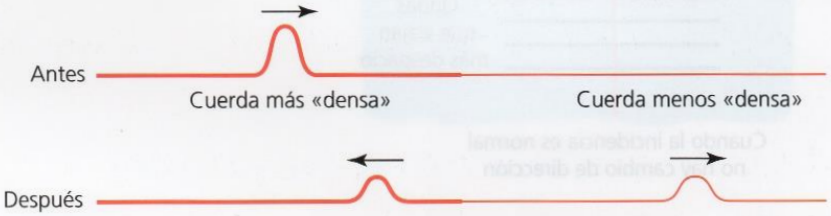
Figura 4.56
Un pulso que viaja por un medio «más denso»

La velocidad del pulso cambia cuando atraviesa una frontera entre cuerdas/muelles con distinta masa por unidad de longitud. En la Figura 4.56 se representa un pulso transversal que es transmitido desde una cuerda menos «densa» a una cuerda más «densa» (con más masa por unidad de longitud), por la que viaja más lentamente.

Observa que ahora hay dos pulsos y que las amplitudes de ambos se han reducido porque la energía se ha tenido que repartir entre los dos. El pulso transmitido tiene ahora una velocidad menor, pero su fase no ha cambiado. El pulso reflejado vuelve con la misma velocidad, pero ha experimentado un cambio de fase de media longitud de onda.

El pulso transversal de la Figura 4.57 pasa de una cuerda más «densa» a una cuerda menos «densa». Esta vez el pulso reflejado no experimenta cambio de fase.

Figura 4.57
Un pulso que viaja por un medio menos «denso»



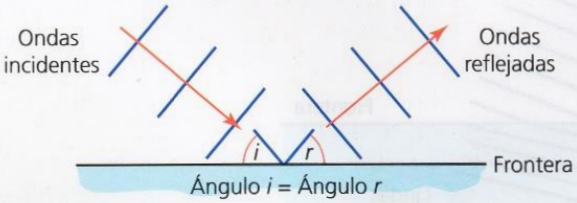
Las ondas y los pulsos longitudinales se comportan de la misma manera que las ondas transversales.

Reflexión en dos dimensiones

Cuando una onda plana se refleja sobre una frontera lisa (plana) entre dos medios, las ondas que entran (**incidentes**) y las que salen (reflejadas) forman ángulos iguales con la frontera (véase Figura 4.58).

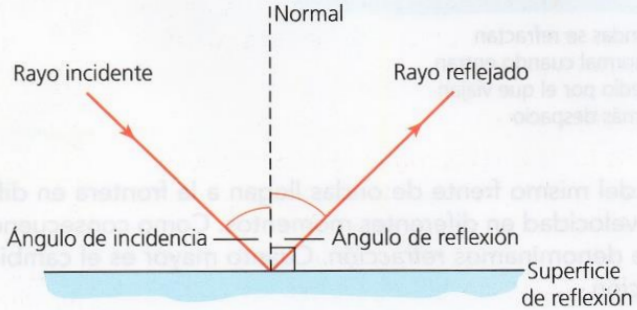
El **ángulo de incidencia**, *i*, es igual al **ángulo de reflexión**, *r*.

Figura 4.58
Reflexión de ondas planas en una frontera lisa



Cuando se trata de la reflexión de la luz, lo más habitual es representarla mediante un **diagrama de rayos** como el de la Figura 4.59.

Figura 4.59
Reflexión de rayos en una superficie de reflexión



Como antes, el ángulo de incidencia, *i*, es igual al ángulo de reflexión, *r*. Sin embargo, en este diagrama los ángulos son los que forman los rayos con la «**normal**». La normal es una línea imaginaria que dibujamos en el diagrama y que es perpendicular a la superficie de reflexión.

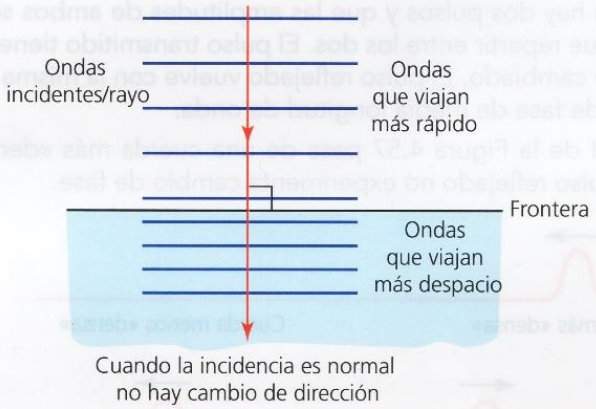
En la práctica ocurre lo mismo que en el caso de las ondas unidimensionales, parte de la energía de la onda se transmite y parte se refleja. Las ondas transmitidas pueden cambiar de dirección. A este efecto se le llama *refracción* y se trata en el subapartado siguiente.

Refracción

Cuando una onda viaja por un medio distinto habitualmente su velocidad cambia. La velocidad de las ondas acuáticas disminuye cuando atraviesan aguas más superficiales. Estos cambios de velocidad pueden tener como consecuencia un cambio en la dirección de la onda.

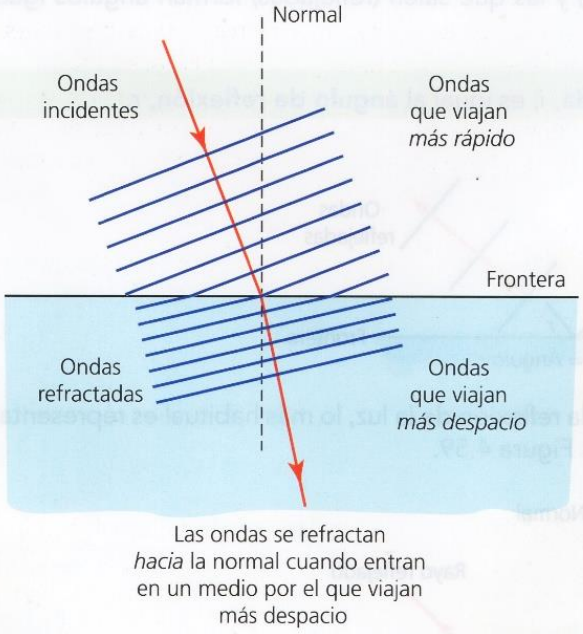
En la Figura 4.60 se representan frentes de onda planos que llegan a un medio distinto en el que viajan más despacio. Los frentes de onda son paralelos a la frontera y los rayos que representan el movimiento de la onda son perpendiculares a la frontera.

Figura 4.60
Las ondas se ralentizan cuando entran en un medio distinto



En este caso no hay cambio de dirección, pero como las ondas están viajando más despacio, su longitud de onda disminuye, aunque su frecuencia permanece constante (ten en cuenta que $c = f\lambda$). Consideremos ahora lo que sucede si los frentes de onda no son paralelos a la frontera, como en la Figura 4.61.

Figura 4.61
Las ondas se refractan cuando entran en un medio más denso



Distintas zonas del mismo frente de ondas llegan a la frontera en diferentes momentos y, por tanto, cambian de velocidad en diferentes momentos. Como consecuencia se produce un cambio de dirección al que denominamos *refracción*. Cuanto mayor es el cambio de velocidad, mayor es el cambio de dirección.

Cuando las ondas entran en un medio por el que viajan más despacio, se refractan *hacia la normal*. A la inversa, cuando entran en un medio por el que viajan más rápido se refractan *alejándose de la normal*. Este efecto se muestra en la Figura 4.62, pero observa que esta figura es análoga a la Figura 4.61 con las ondas viajando en sentido contrario.

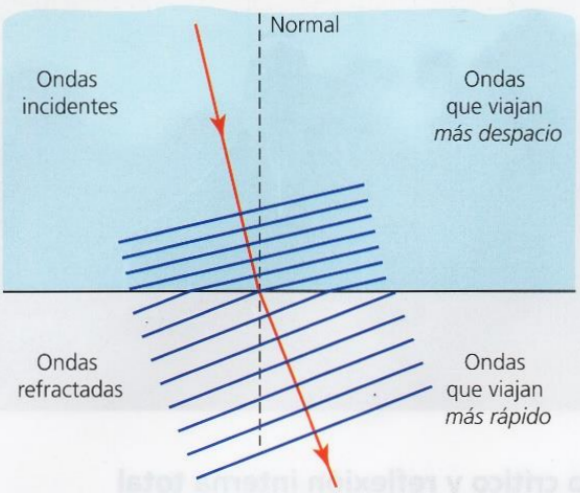


Figura 4.62
Las ondas se refractan cuando entran en un medio menos denso

Las ondas se refractan *alejándose* de la normal cuando entran en un medio por el que viajan más rápido

La refracción de la luz es un tema que se trata habitualmente en física, especialmente cuando se estudian las lentes y los prismas, pero todas las ondas experimentan refracción cuando se produce un cambio en su velocidad. A menudo se trata de un cambio repentino que tiene lugar en la frontera entre dos medios, pero también puede ser un cambio gradual, por ejemplo si la densidad del medio cambia gradualmente.

En la fotografía de la Figura 4.63 se puede observar la refracción gradual de las olas que se acercan a la costa. La observación de la refracción de las olas en aguas poco profundas permite estudiar los cambios en la profundidad del agua. Las olas viajan más despacio en aguas superficiales, por tanto, las crestas de las olas se juntan (longitud de onda más corta) porque la frecuencia no cambia.

El enfoque de una lente de cristal se produce porque las ondas de luz se ralentizan y se refractan de forma sistemática por la suave curvatura de la lente (véase Figura 4.64). La refracción de la luz a través de más de una lente nos permite ampliar el rango de visión humana desde lo más pequeño (microscopios) a lo más lejano (telescopios). La *reflexión* de la luz mediante espejos curvos también sirve para enfocar la luz y se utiliza en algunos telescopios y microscopios.



Figura 4.63
Las olas oceánicas se refractan (y se difractan) cuando se aproximan a la playa



Figura 4.64
Una lente enfoca la luz mediante la refracción

Las ondas de luz de la Figura 4.65 se refractan de una forma más desorganizada como consecuencia de la irregularidad de los cambios en la densidad del aire caliente que se desplaza sobre la pista y detrás del avión.



Figura 4.65
Refracción difusa de la luz debida a los gases calientes

Ley de Snell, ángulo crítico y reflexión interna total

En la Figura 4.66 se muestra un único rayo de luz que representa la dirección de las ondas que se refractan cuando entran en un medio por el que viajan más despacio (Figura 4.66a) y en un medio por el que viajan más rápido (Figura 4.66b).

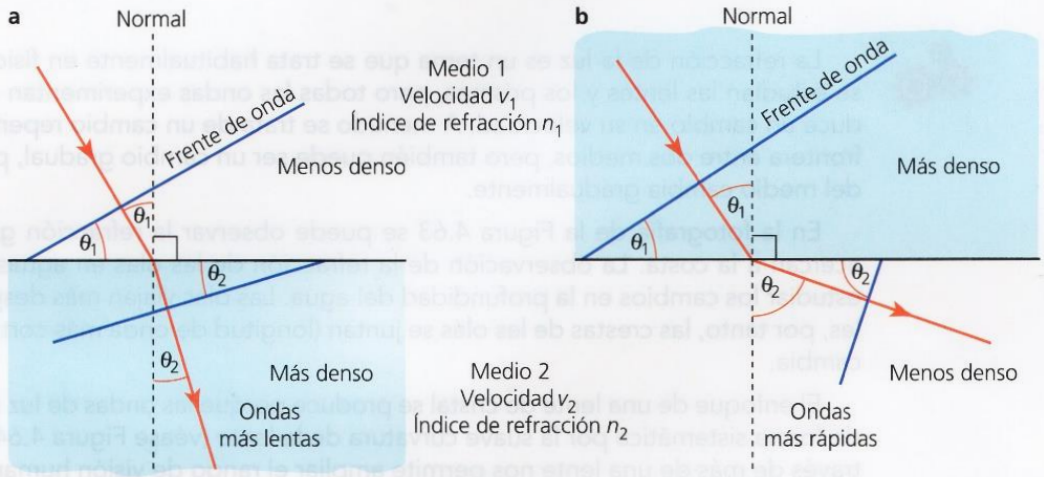


Figura 4.66
Rayos de luz refractados
a *hacia la normal*
b *alejándose de la normal*

Para una frontera entre los medios determinados, se ha descubierto experimentalmente que todo ángulo de incidencia, θ_1, está relacionado con su correspondiente ángulo de refracción, θ_2, mediante la ecuación:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \text{constante}, n$$

Mediante la trigonometría podemos demostrar que este cociente es constante, porque el cociente de las velocidades de las ondas en los dos medios (v_1/v_2) es constante.

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \text{constante} = \frac{v_1}{v_2}$$

Cuando la luz viaja *desde el aire* (o, para ser más exactos, desde el vacío) hacia un medio determinado, la constante se denomina **índice de refracción**, n, del medio.

$$n_{\text{medio}} = \frac{\text{sen } \theta_{\text{aire}}}{\text{sen } \theta_{\text{medio}}} = \frac{v_{\text{aire}}}{v_{\text{medio}}}$$

El índice de refracción no tiene unidades, puesto que es un cociente.

Como la velocidad de la luz en el aire es (casi) la misma que en el vacío, el índice de refracción del aire es 1,0.

Por ejemplo, la velocidad de la luz en aire (o en el vacío) es $3{,}0 \times 10^8\,m\,s^{-1}$ y en un determinado tipo de vidrio puede ser $2{,}0 \times 10^8\,m\,s^{-1}$, de manera que el índice de refracción de este tipo de vidrio sería 1,5. Con esta información podemos calcular después el ángulo de refracción para cualquier ángulo de incidencia.

Consideremos de nuevo la Figura 4.66a (o la Figura 4.66b), el índice de refracción del medio 1, $n_1 = \frac{v_{aire}}{v_1}$ y el índice de refracción del medio 2, $n_2 = \frac{v_{aire}}{v_2}$, de manera que:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\text{sen}\,\theta_2}{\text{sen}\,\theta_1} = \frac{v_2}{v_1}$$

Esta relación se conoce como **ley de Snell** y figura en el *Apéndice de datos de Física.*

El índice de refracción de un sólido transparente se puede determinar experimentalmente mediante la localización de las trayectorias de los rayos de luz que atraviesan un bloque con forma de paralelepípedo. En la Figura 4.67 se representa la trayectoria de un único rayo que entra y sale del bloque. Puede viajar en cualquiera de los dos sentidos. Una vez localizados los dos rayos (el que entra y el que sale), se puede dibujar la trayectoria del rayo en el interior del bloque y se pueden medir los ángulos de incidencia y de refracción. A partir de toda esta información se puede determinar un valor experimental del índice de refracción. Se puede repetir el mismo proceso para otros ángulos de incidencia, con lo que se obtienen diversos valores experimentales del índice de refracción y se puede calcular un índice de refracción medio. Otro método alternativo para determinar el índice de refracción es mediante la representación gráfica de los valores de θ_1 en función de θ_2, que da lugar a una recta cuyo gradiente es igual al índice de refracción.

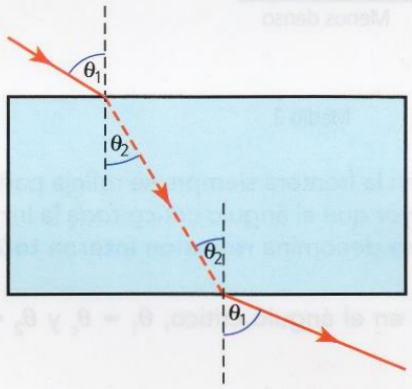


Figura 4.67 *Rayos de luz atravesando un bloque transparente con forma de paralelepípedo.*

Ejemplo resuelto

9 **a** Calcula el ángulo de refracción de las ondas de luz representadas por un rayo cuyo ángulo de incidencia es 60°, y que entra en un cristal con un índice de refracción de 1,52.

b ¿Cuál será la velocidad de la luz en el cristal? (Velocidad de la luz en el aire = $3{,}0 \times 10^8\,m\,s^{-1}$)

a $n_{cristal} = \frac{\text{sen}\,\theta_{aire}}{\text{sen}\,\theta_{cristal}}$ $1{,}52 = \frac{\text{sen}\,60}{\text{sen}\,\theta_{cristal}}$

ángulo de refracción = $\theta_{cristal} = 35°$

b $n_{cristal} = \frac{v_{aire}}{v_{cristal}}$

$1{,}52 = \frac{(3{,}0 \times 10^8)}{v_{cristal}}$

$v_{cristal} = 2{,}0 \times 10^8\,m\,s^{-1}$

45 Los rayos de luz del aire entran en un líquido con un ángulo de 38°. Si el índice de refracción del líquido es 1,4, ¿cuál es el ángulo de refracción?

46 Las ondas de agua planas que viajan a $48\,cm\,s^{-1}$ entran en una zona de aguas poco profundas en la que los frentes de onda forman un ángulo de 34° con la frontera que separa ambos medios. Si las ondas viajan por el agua superficial a una velocidad de $39\,cm\,s^{-1}$, predice en qué dirección se desplazarán.

47 Los rayos de luz viajan a $2{,}23 \times 10^8\,\text{m s}^{-1}$ por un líquido y a $3{,}0 \times 10^8\,\text{m s}^{-1}$ por el aire.
- **a** ¿Cuál es el índice de refracción del líquido?
- **b** Los rayos de luz que salen del líquido y entran en el aire inciden con un ángulo de 25° sobre la superficie de separación de ambos medios. ¿Qué ángulo forma el rayo que emerge en el aire con respecto a la normal?

48 El índice de refracción de un determinado tipo de cristal es 1,55. Si la luz procedente del agua (índice de refracción = 1,33) atraviesa el cristal con un ángulo de refracción de 42°, ¿cuál es el ángulo de incidencia?

49 **a** Utiliza la trigonometría para demostrar que el cociente de los índices de refracción entre dos medios es igual al cociente de las velocidades de las ondas en ambos medios $\left(\frac{v_1}{v_2}\right)$.
- **b** Demuestra que el índice de refracción de las ondas que pasan del medio 1 al medio 2 viene dado por $_1n_2 = \frac{n_2}{n_1}$.

50 Explica por qué es imposible que el índice de refracción de un medio sea menor que la unidad.

Reflexión interna total

Consideremos de nuevo la Figura 4.66b, en la que se representa una onda/un rayo que entra en un medio menos denso desde el punto de vista óptico (un medio por el que la luz viaja más rápido). Si el ángulo de incidencia, θ_1, aumenta gradualmente, el rayo refractado se acerca cada vez más hacia la frontera entre ambos medios. Cuando el ángulo de incidencia toma un determinado valor, el rayo refractado forma un ángulo de 90° con la normal y se alinea con la frontera (véase Figura 4.68). Este ángulo se denomina **ángulo crítico**, θ_c, y se representa en color rojo en el diagrama.

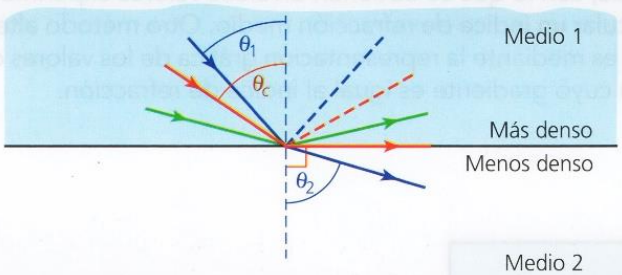


Figura 4.68
La reflexión interna total se produce cuando el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico, θ_c

Sea cual sea el ángulo de incidencia, en la frontera siempre se refleja parte de la luz incidente, pero cuando el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico *toda* la luz se refleja y permanece en el medio más denso. Este fenómeno se denomina **reflexión interna total**.

Sabemos que $\frac{n_1}{n_2} = \frac{\text{sen}\,\theta_2}{\text{sen}\,\theta_1}$, pero en el ángulo crítico, $\theta_1 = \theta_c$ y $\theta_2 = 90°$, por tanto $\theta_2 = 1$, y entonces:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{\text{sen}\,\theta_c}$$

La situación más habitual es que la luz intente pasar desde un medio ópticamente más denso (medio 1), como el vidrio, el plástico o el agua, *hacia el aire* (medio 2), de manera que $n_2 = n_{\text{aire}} = 1$, y por tanto:

$$n_{\text{medio más denso}} = \frac{1}{\text{sen}\,\theta_c}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física* para la Opción C, pero *no* para el Capítulo 4.

Para investigar ángulos críticos experimentalmente se deben rastrear los rayos de luz a través de un material que no tenga forma de paralelepípedo. Lo más adecuado es utilizar un bloque semicircular de vidrio o de plástico. El ángulo crítico de un líquido se puede determinar mediante una lámpara de bajo voltaje y baja potencia sujeta con seguridad en el interior del recipiente.

Un material con un índice de refracción elevado tiene un ángulo crítico pequeño, lo que significa que la probabilidad de reflexión interna es muy elevada. Los altos índices de refracción de determinados tipos de cristales y piedras preciosas (como el diamante, por ejemplo) son los responsables de su apariencia «brillante».

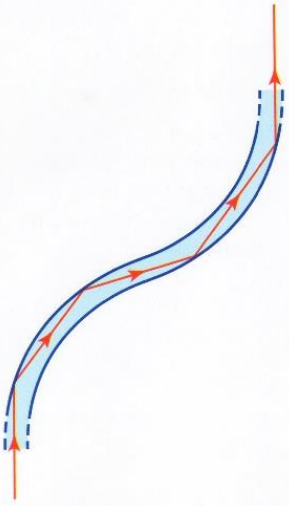


Figura 4.69
Reflexión interna total a lo largo de una fibra de vidrio

Una de las aplicaciones más importantes de la reflexión interna total está en el ámbito de las comunicaciones. La luz que entra en una fibra de vidrio queda atrapada en su interior como consecuencia de las múltiples reflexiones internas que se producen, y, por tanto, puede recorrer largas distancias siguiendo la forma de la fibra (véase la Figura 4.69). Se puede modificar la luz para que transmita información digital de forma muy eficiente.

Ejemplo resuelto

10 El índice de refracción de un determinado tipo de vidrio es1,54 y el del agua es 1,33.

a ¿Por cuál de estos dos medios viaja más rápido la luz?

b ¿En qué circunstancias se produciría reflexión total de la luz incidente sobre la frontera entre estos dos medios?

c Calcula el ángulo crítico para la luz que pasa por estos dos medios.

a El agua (porque tiene un índice de refracción más bajo).

b Cuando pasa de vidrio a agua con un ángulo de incidencia mayor que el ángulo crítico.

c $\text{sen}\ \theta_c = {}_{\text{vidrio}}n_{\text{agua}} = \dfrac{v_{\text{vidrio}}}{v_{\text{agua}}}$

pero $n_{\text{vidrio}} = \dfrac{v_{\text{aire}}}{v_{\text{agua}}}$ y $n_{\text{agua}} = \dfrac{v_{\text{aire}}}{v_{\text{agua}}}$

por tanto $\dfrac{v_{\text{vidrio}}}{v_{\text{agua}}} = \dfrac{n_{\text{agua}}}{n_{\text{vidrio}}}$

de aquí, $\text{sen}\ \theta_c = \dfrac{n_{\text{agua}}}{n_{\text{vidrio}}} = \dfrac{1{,}33}{1{,}54} = 0{,}863$

$\theta_c = 59{,}7°$

51 **a** Calcula el índice de refracción de la luz en agua de mar si su velocidad es $2{,}21 \times 10^8\,\text{m s}^{-1}$.

b Calcula el ángulo crítico para la luz que pasa entre el agua de mar y el aire.

52 **a** Describe un experimento para medir el ángulo crítico de la luz en vidrio.

b Sugiere un método para medir el ángulo crítico de la luz en agua.

53 Busca información en Internet sobre el revestimiento metálico de fibras ópticas y sobre los *ángulos de aceptación*. Redacta un breve resumen de lo que has averiguado.

54 Averigua cómo se puede utilizar la luz que viaja por una fibra óptica para transmitir datos.

Aplicación

Reflexión interna total y endoscopia

La reflexión interna total de la luz en el interior de una fibra óptica se utiliza en las endoscopias para llevar a cabo reconocimientos médicos. La luz procedente del exterior se envía a través de una fibra óptica para iluminar el interior del cuerpo. También se utilizan fibras ópticas con una lente en cada extremo para obtener una imagen enfocada que se puede visualizar desde el exterior directamente, o bien, a través de una cámara y un monitor (véase Figura 4.70).

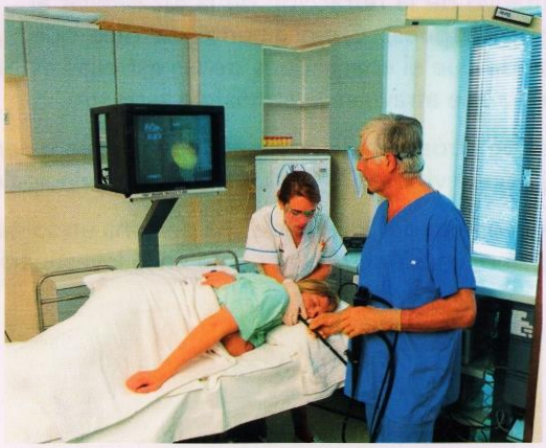


Figura 4.70 *Reconocimiento del estómago de una paciente mediante una endoscopia*

Las endoscopias se utilizan de forma generalizada en el diagnóstico de enfermedades y cada vez más en cirugía menor o en la toma de muestras para su posterior biopsia. Los endoscopios se pueden insertar a través de cualquier orificio natural e incluso a través de una incisión practicada por el cirujano.

1 Existen muchos tipos de endoscopios que se utilizan para distintas partes del cuerpo. Busca información en Internet sobre un tipo concreto de endoscopio y redacta un breve informe para presentarlo a tus compañeros.

Dispersión de la luz

Las velocidades de los distintos colores (longitudes de onda) de la luz en un medio determinado (por ejemplo el vidrio) no son exactamente iguales. La luz roja es la que viaja más rápido y la violeta es la más lenta. Como consecuencia, distintos colores que proceden de una misma fuente y que viajan en la misma dirección no recorren exactamente las mismas trayectorias cuando se refractan. Cuando la luz atraviesa un vidrio con forma de paralelepípedo (como una ventana), este efecto no suele ser significativo. En cambio, cuando la luz blanca entra o sale de vidrios con otras formas (como los **prismas** o las **lentes**), o bien atraviesa gotas de agua, puede **dispersarse** (separarse en distintos colores). Para dispersar la luz blanca y obtener un espectro (Figura 4.22) se suele utilizar un prisma triangular como el que se muestra en la Figura 4.71.

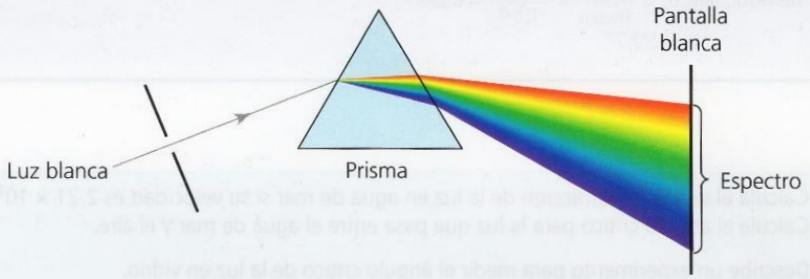


Figura 4.71
Uso de un prisma para obtener un espectro de luz blanca

Perspectivas adicionales

Ibn al-Haytham

Hasta hace poco el importante papel desempeñado por los científicos islámicos había sido insuficientemente reconocido por otras culturas. Se puede decir que Ibn al-Haytham (Figura 4.72), un científico del siglo XI también conocido como Alhazen, es uno de los mejores físicos de todos los tiempos. Fue un pionero del «método científico» moderno, ya que insistió en la experimentación y en el establecimiento de modelos matemáticos, pero vivió siglos antes que Galileo y los demás científicos ampliamente reconocidos por llevar a cabo innovaciones similares.



Figura 4.72
Ibn al-Haytham

Su obra abarca un amplio espectro de temas, incluyendo el estudio experimental y cuantitativo de la refracción de la luz (similar al que llevó a cabo Snell siglos después). Curiosamente, se dice que fue el primero en percatarse de que el «parpadeo» de las estrellas es debido a la refracción de la luz que atraviesa la atmósfera terrestre.

1 Averigua los nombres de otros científicos y matemáticos que vivieron en el siglo XI o unos pocos siglos antes. ¿Dónde vivieron? ¿Cuáles fueron sus principales descubrimientos?

2 ¿Es el progreso científico fruto del trabajo de una persona en solitario, o bien es la colaboración, y no el secretismo, un aspecto importante en la investigación?

Difracción a través de una rendija simple y alrededor de un objeto

Cuando las ondas atraviesan orificios (*aberturas*) o rodean obstáculos que aparecen en su trayectoria, tienden a «desviarse» o a «doblarse» a su alrededor. Este importante efecto se denomina **difracción** (un término que no debe confundirse con *refracción*). Las ondas suelen encontrar obstáculos en su trayectoria y el estudio de la difracción es crucial para comprender cómo se desplazan de un lugar a otro. En esta época de comunicaciones inalámbricas esta comprensión cobra una especial importancia.

En las condiciones adecuadas *todas* las ondas se difractan, y el hecho de que algo se difracte constituye una clara evidencia de su naturaleza ondulatoria. En ocasiones los efectos de la difracción son muy notorios porque suele producirse en olas y en ondas de sonido, pero en otros casos puede ser difícil de observar, como ocurre con la difracción de ondas luminosas. Esto último se debe a que la magnitud de la difracción depende de la relación entre el tamaño de la longitud de onda y el tamaño del orificio o del obstáculo.

La difracción es más importante cuando la longitud de onda y el orificio o el obstáculo tienen aproximadamente el mismo tamaño.

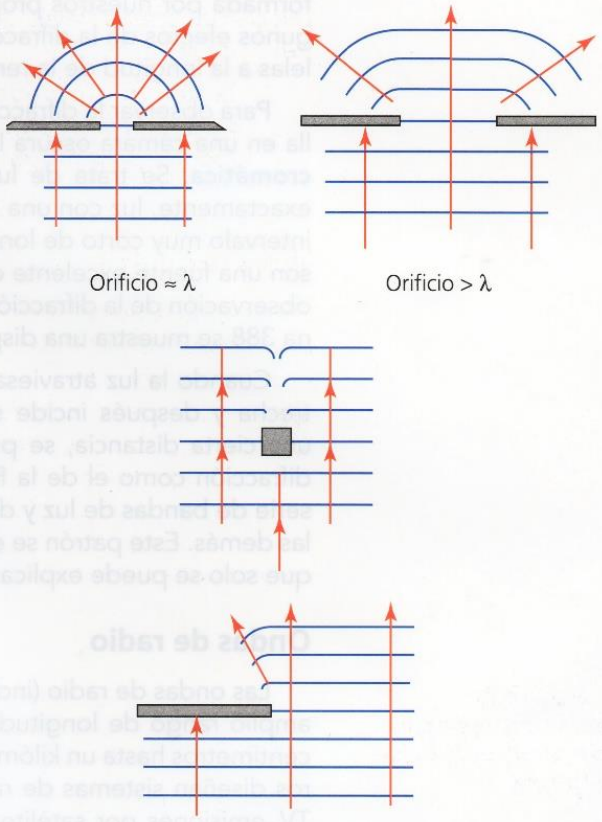


Figura 4.73
Difracción de ondas planas a través de orificios y alrededor de obstáculos (no se representan las ondas reflejadas)

En la Figura 4.73 se representa la difracción bidimensional de ondas planas a través de rendijas y alrededor de obstáculos. Este diagrama es aplicable a la difracción de todo tipo de ondas, incluso las tridimensionales, aunque es importante comprender que se trata de diagramas simplificados. Este tipo de patrones de difracción se pueden observar fácilmente en las olas generadas en un tanque de oleaje (Figura 4.29).

Ejemplos de difracción

Sonido

Las longitudes de onda se encuentran habitualmente en el intervalo comprendido entre 2 cm y 20 cm. Como consecuencia, el sonido se difracta fácilmente en las esquinas, los edificios, las puertas y los muebles y por eso podemos escucharlo incluso cuando no podemos ver de dónde proviene.

Los sonidos graves tienen longitudes de onda más largas y, por tanto, se difractan mejor alrededor de objetos grandes, como los edificios; por eso tendemos a oírlos desde más lejos. Los sonidos graves también se propagan mejor a través de altavoces grandes (que se suelen denominar «altavoces de graves» o «*woofers*»), mientras que los sonidos agudos se oyen mejor en altavoces pequeños («altavoces de agudos»).



Figura 4.74
Este altavoz de gran tamaño es adecuado para emitir longitudes de onda largas a volumen alto

Luz

Los diversos colores de la luz tienen longitudes de onda inferiores a 10^{-6} m (10^{-3} mm). Como consecuencia, la difracción de la luz tiende a pasar desapercibida, ya que solo los orificios muy pequeños difractan la luz significativamente. Sin embargo, la difracción de la luz que nos entra por los ojos limita nuestra capacidad de ver (distinguir) detalles y también limita la resolu-

ción de los telescopios y los microscopios. Si observamos una superficie blanca a través de una rendija formada por nuestros propios dedos, podemos ver algunos efectos de la difracción: unas líneas negras paralelas a la longitud de la rendija.

Para observar la difracción de la luz sobre una pantalla en una cámara oscura lo mejor es utilizar **luz monocromática**. Se trata de luz de un único color o, más exactamente, luz con una única longitud de onda (o un intervalo muy corto de longitudes de onda). Los láseres son una fuente excelente de luz monocromática para la observación de la difracción. En la Figura 9.6 de la página 388 se muestra una disposición experimental típica.

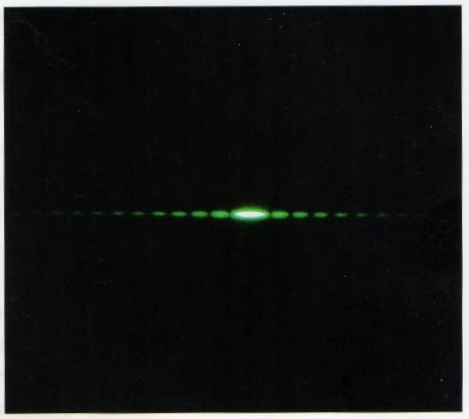


Figura 4.75
Patrón de difracción de la luz monocromática que atraviesa una rendija

Cuando la luz atraviesa una rendija vertical muy estrecha y después incide sobre una pantalla separada una cierta distancia, se puede observar un patrón de difracción como el de la Figura 4.75. Se observan una serie de bandas de luz y de bandas oscuras, con una banda central más ancha y más brillante que las demás. Este patrón se estudiará más adelante en el Capítulo 9, pero es importante comprender que solo se puede explicar a partir de una teoría *ondulatoria* de la luz.

Ondas de radio

Las ondas de radio (incluidas las microondas) tienen un amplio rango de longitudes de onda, desde unos pocos centímetros hasta un kilómetro o más. Cuando los ingenieros diseñan sistemas de radiocomunicaciones para radio, TV, emisiones por satélite y teléfonos móviles, por ejemplo, tienen que escoger una longitud de onda conveniente. Para ello deben considerar qué distancia deben recorrer las ondas entre el emisor y el receptor, y si hay obstáculos en la trayectoria, como edificios o colinas. En teoría, el tamaño de las antenas de emisión y de recepción debe ser comparable al de las longitudes de onda utilizadas, aunque es posible que se tenga que reducir para abaratar costes. Por ejemplo, las longitudes de onda utilizadas habitualmente para teléfonos móviles son de unos pocos centímetros.



Figura 4.76
Las microondas emitidas por antenas se difractan

Rayos X

Los efectos de la difracción (para una longitud de onda determinada) dependen del tamaño del objeto que ocasiona la difracción. Podemos, por tanto, obtener información sobre este objeto a partir de la observación y de la medida de la difracción que ocasiona el objeto sobre una onda cuya longitud de onda es conocida. Esta idea tiene importantes aplicaciones. Los rayos X, por ejemplo, tienen longitudes de onda comparables al tamaño de los átomos, lo que permite a los científicos estudiar el espaciado de los átomos y su disposición en un sólido cristalino.

Perspectivas adicionales

Tsunamis

Las consecuencias de los tsunamis que siguieron a los devastadores terremotos que se produjeron en la isla indonesia de Sumatra el 26 de diciembre de 2004 y en la costa noreste japonesa el 11 de marzo de 2011, fueron trágicas y abrumadoras. El repentino y masivo desplazamiento de la corteza terrestre a lo largo de una línea de falla transmitió energía al océano situado encima, y tuvo como consecuencia el movimiento de un enorme volumen de agua.

Un tsunami producido por un terremoto viaja a gran velocidad (tal vez a lo largo de miles de kilómetros) con muy poca pérdida de energía, de ahí las enormes consecuencias que puede tener su llegada a la costa.

Pero, ¿por qué algunas áreas son más gravemente afectadas que otras? Por supuesto que uno de los principales factores es la altitud de la costa, así como la distribución de las viviendas y las personas. Una explicación más exhaustiva debe incluir también la refracción, la reflexión y la difracción de las ondas incidentes cuando se aproximan a la costa. Los cambios en la profundidad del agua y su orientación (respecto a la costa) afectan a la altura y a la forma de las ondas, así como a su movimiento. La forma de la línea de costa puede producir reflexiones y difracciones que tienen un efecto de concentración.

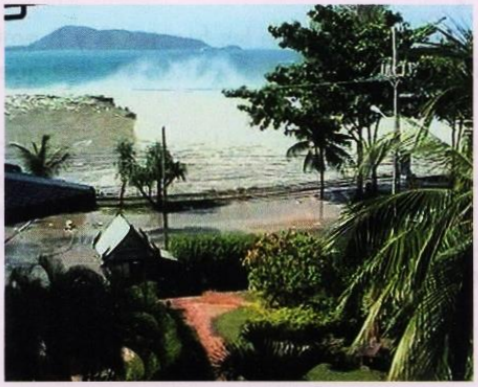


Figura 4.77
El tsunami de diciembre de 2004 tuvo efectos devastadores sobre las tierras bajas

Estos mismos argumentos permiten explicar por qué algunas playas son mucho mejores que otras para hacer surf.

1 ¿Por qué se producen las olas oceánicas y por qué siempre parece que vayan hacia la orilla (en lugar de alejarse de ella)?

Aplicaciones

«Huellas» de satélite

En la Figura 4.78 se representa la intensidad de la señal que llega a la superficie de la Tierra desde un satélite de emisión de TV ubicado en cualquier punto sobre el ecuador terrestre. Los distintos anillos coloreados representan el diámetro de la antena (el «plato») necesario para recibir una señal lo suficientemente potente. Por ejemplo, las viviendas situadas en el anillo exterior necesitan una antena con un diámetro 120/50 = 2,4 veces más ancho que las viviendas situadas en el centro de los anillos. Esto sugiere que la intensidad recibida es aproximadamente seis veces mayor en el centro que en el anillo exterior.

La transmisión de la antena en el satélite no envía las señales de TV por igual en todas las direcciones, pero dirige las ondas a los lugares requeridos sobre la superficie de la Tierra (véase la figura 4.79). Las ondas que emergen de la antena y los reflectores experimentan una difracción, que es la responsable del tamaño y la forma de la «huella».

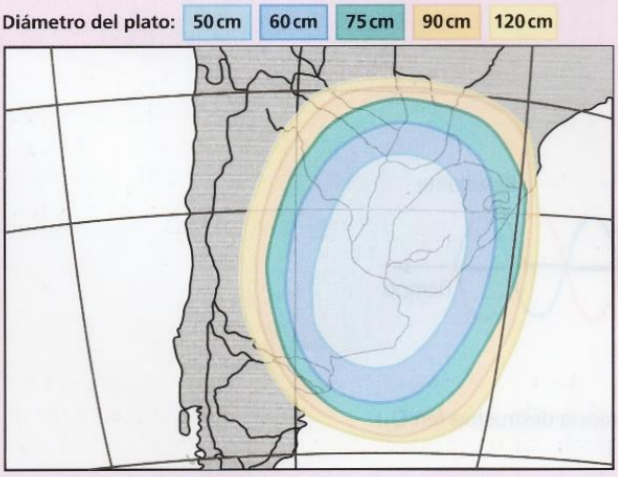


Figura 4.78
Huella de satélite y diámetros de plato

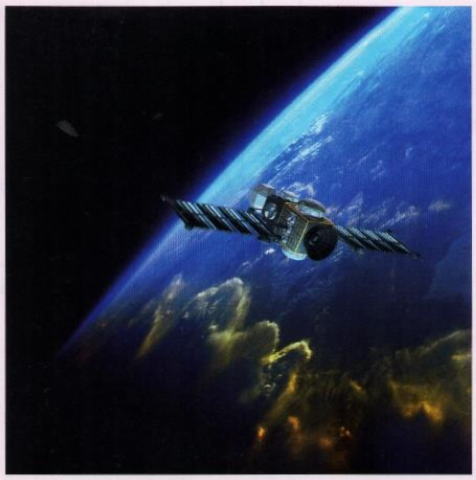


Figura 4.79
Satélite para la emisión de señales de TV

1 Explica por qué la información de la Figura 4.78 sugiere que la intensidad de la señal es aproximadamente seis veces más alta en el centro que en el anillo exterior.

2 Investiga cuáles son las longitudes de onda habituales de las ondas electromagnéticas utilizadas en las transmisiones de TV vía satélite y compáralas con el tamaño de las antenas de transmisión y de recepción.

Patrones de interferencia

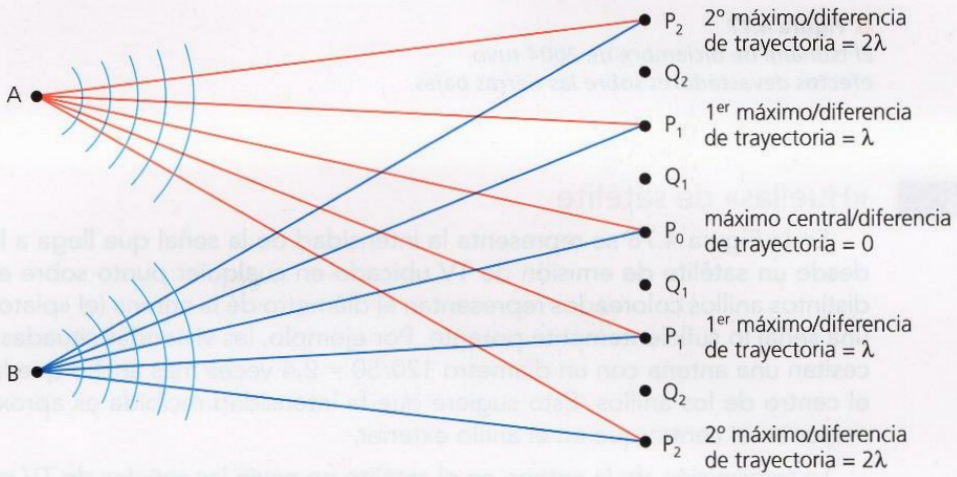
Estamos rodeados por muchos tipos de ondas, y, evidentemente, sus trayectorias se cruzan continuamente. Cuando distintas ondas se cruzan, o se «encuentran», normalmente se atraviesan sin mayores consecuencias, pero si son similares (en amplitud y longitud de onda) los resultados pueden ser importantes. Este efecto de *superposición* se conoce como **interferencia** de las ondas.

Interferencia constructiva y destructiva

Consideremos la Figura 4.80. Supongamos que las fuentes A y B emiten ondas con la misma frecuencia y en fase (o con una diferencia de fase constante). Se dice que estas fuentes son **coherentes**.

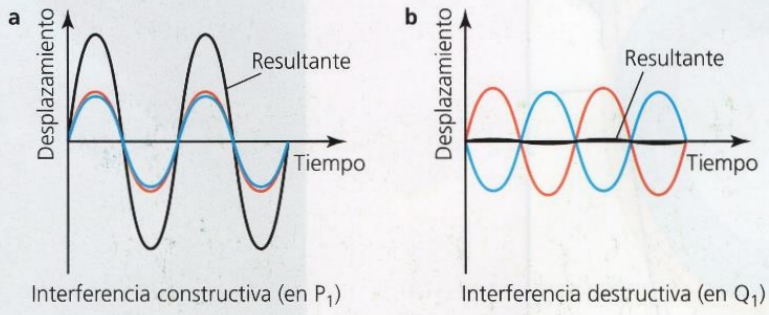
Cuando estas ondas recorren distancias iguales y a la misma velocidad para encontrarse en un punto P_0 equidistante de ambas fuentes, llegan *en fase*. Según el principio de superposición, sabemos que si las ondas individuales tienen la misma amplitud, la oscilación resultante en P_0 tiene una amplitud doble que la de las oscilaciones individuales. Se trata de un ejemplo de **interferencia constructiva**, como la que se muestra en la Figura 4.81a.

Figura 4.80
Interferencia y diferencia de trayectorias



De manera análoga existen otros puntos, como P_1 y P_2, donde las ondas están *en fase* e interfieren constructivamente, porque una de las ondas va una longitud de onda por delante de la otra (o dos longitudes, o tres, etc.).

Figura 4.81
Interferencia constructiva y destructiva



Diferencia de fase

En general, podemos afirmar que, en estas circunstancias, se produce una interferencia constructiva en un punto cualquiera donde la **diferencia de fase** equivale a un número entero de longitudes de onda. La diferencia de fase es la diferencia entre las distancias recorridas por las ondas procedentes de dos fuentes distintas que llegan a un mismo punto.

En otros lugares, como los puntos Q_1 y Q_2, las ondas llegan en *contrafase*, porque una de las ondas va media longitud de onda por delante de la otra (o una longitud y media, o dos longitudes y media, etc.). En estos lugares la oscilación resultante es mínima, un efecto denominado **interferencia destructiva** (como la que se muestra en la Figura 4.81b). La oscilación resultante probablemente no es cero porque la amplitud de una de las ondas es mayor que la de la otra, ya que las distancias que han recorrido son distintas. En general el patrón de interferencia tiene el aspecto que se muestra en la Figura 4.82.

El hecho de que haya lugares donde la combinación de dos ondas puede producir una onda resultante cero es especialmente importante porque es un comportamiento *propio* de las ondas. Por ejemplo, cuando se descubrió que la luz puede interferir se llegó a una única conclusión posible: la luz debe viajar en forma de onda.

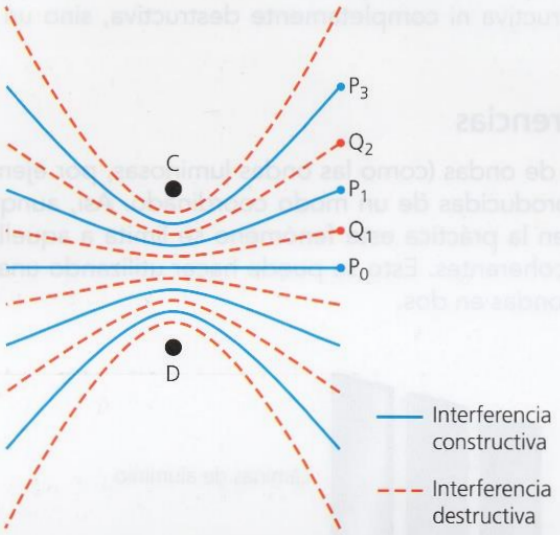


Figura 4.82
Patrón de interferencias producido por las ondas coherentes que proceden de dos fuentes, C y D

El fenómeno de la combinación de dos ondas para producir cero ondas en determinados lugares puede parecer que contradice el principio de conservación de la energía. Sin embargo, la energía «perdida» aparece en otros lugares del patrón de interferencias, justamente allá donde la interferencia es constructiva y la amplitud es doble. (Recordemos que doblar la amplitud de una oscilación implica cuadriplicar la energía).

La interferencia de ondas procedentes de dos fuentes se puede observar experimentalmente utilizando un tanque de oleaje (Figura 4.29). En la Figura 4.83 se muestra un patrón de interferencia típico. Debe compararse con el del lado derecho de la Figura 4.82.

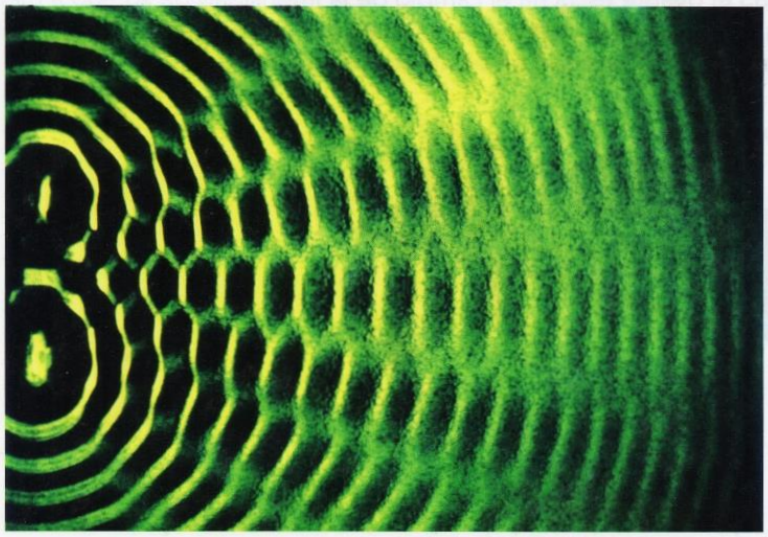


Figura 4.83
Interferencias en un tanque de oleaje

Resumen de las condiciones necesarias para la interferencia

La condición para que se produzca una interferencia constructiva en un punto es que lleguen ondas coherentes en fase. Esto sucede cuando la diferencia de fase es igual a un número entero de longitudes de onda.

En una interferencia constructiva la diferencia de fase = $n\lambda$ (donde n es un número entero: 1, 2, 3, etc.)

La condición para que se produzca una interferencia destructiva en un punto es que lleguen ondas coherentes en contrafase. Esto sucede cuando la diferencia de fase es igual a un número impar de medias longitudes de onda.

En una interferencia destructiva la diferencia de fase = $(n + \frac{1}{2})\lambda$

Estas dos condiciones figuran en el *Apéndice de datos de Física*.

En la mayor parte de los puntos de un patrón de interferencias no se produce ni una interferencia completamente constructiva ni completamente destructiva, sino un intermedio entre ambos extremos.

Ejemplos de interferencias

Las diferentes fuentes de ondas (como las ondas luminosas, por ejemplo) no suelen ser coherentes porque no están producidas de un modo coordinado. Así, aunque en principio *todas* las ondas pueden interferir, en la práctica este fenómeno se limita a aquellas ondas que se pueden modificar para que sean coherentes. Esto se puede hacer utilizando una única fuente de ondas y dividiendo los frentes de ondas en dos.

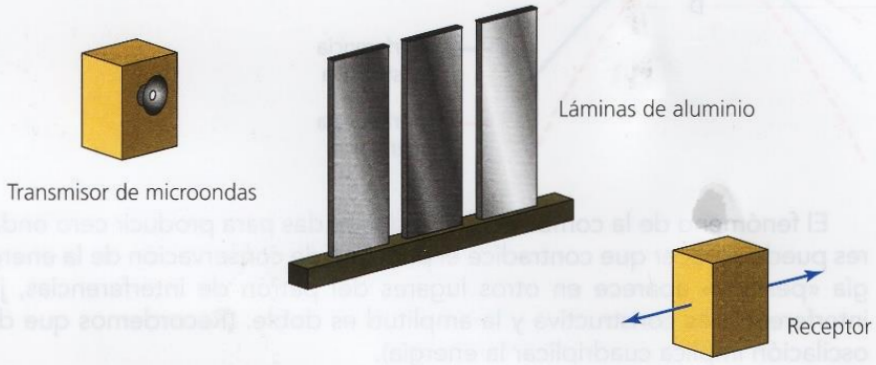


Figura 4.84 *Interferencia de microondas*

Interferencia de ondas de sonido

Se pueden generar ondas idénticas mediante dos fuentes accionadas por una misma señal electrónica, como la de un transmisor de radio o de microondas, o unos altavoces de sonido. En la Figura 4.85 el oyente escucha el cambio de la intensidad de sonido a medida que pasa por delante de los altavoces. (Las reflexiones indeseadas de las paredes hacen difícil escuchar claramente estos cambios de intensidad en el interior de una habitación).

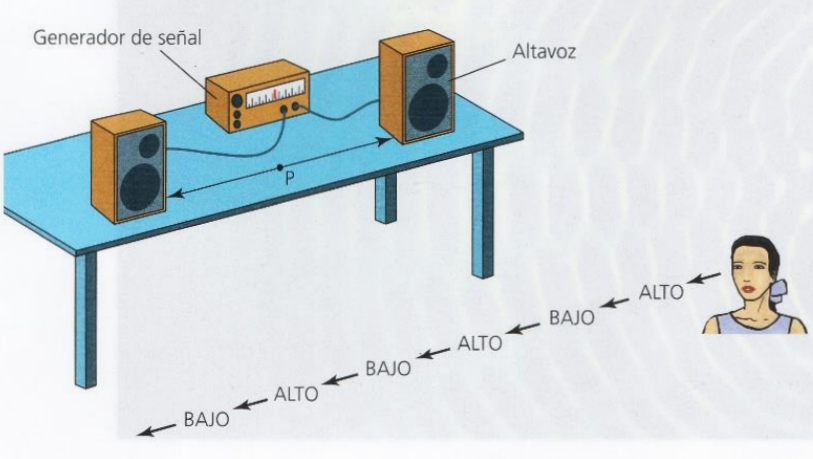


Figura 4.85 *Interferencia de ondas de sonido*

Interferencias a través de una rendija doble

Las interferencias de las ondas luminosas se pueden observar en una habitación a oscuras haciendo pasar luz láser monocromática a través de dos rendijas colocadas muy cerca una de otra. El patrón de interferencias resultante se puede observar en una pantalla alejada (véase Figura 4.86). También se puede utilizar luz blanca (con o sin filtros), pero en ese caso el patrón es más difícil de observar.

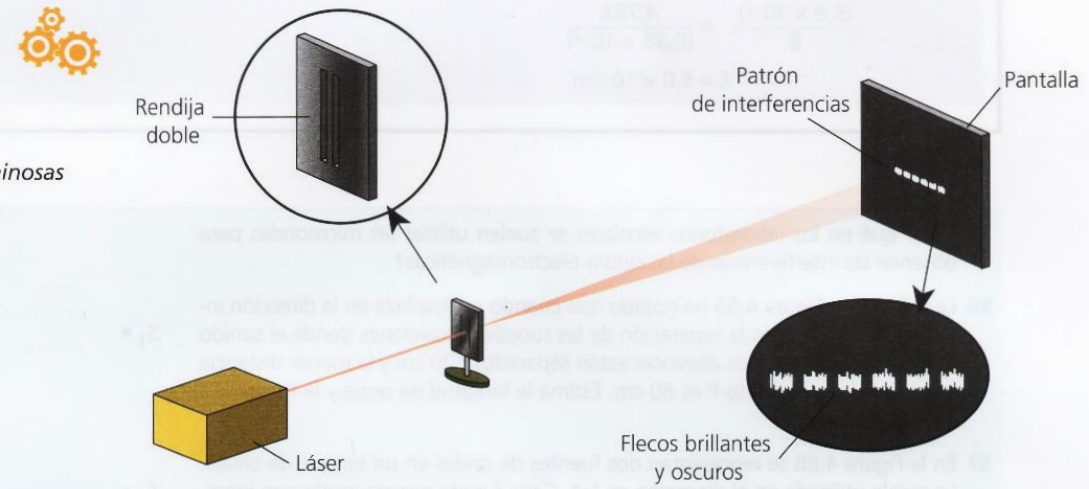


Figura 4.86 *Interferencias de las ondas luminosas*

En la pantalla se pueden ver una serie de «flecos» claros y oscuros. El patrón es similar al patrón de difracción que se obtiene cuando la luz pasa a través de una sola rendija, aunque en el patrón de interferencias la anchura de los flecos es más o menos la misma. Cuanto más cerca están las rendijas, mayor es el espaciado en el patrón de interferencias.

Este experimento fue llevado a cabo por primera vez por Thomas Young y tiene una gran relevancia histórica, porque la observación de la interferencia de la luz confirmó su naturaleza ondulatoria (ya que solo las ondas pueden experimentar interferencias o difracción). Las medidas geométricas del experimento permiten determinar la longitud de onda de la luz empleada (véase Figura 4.87).

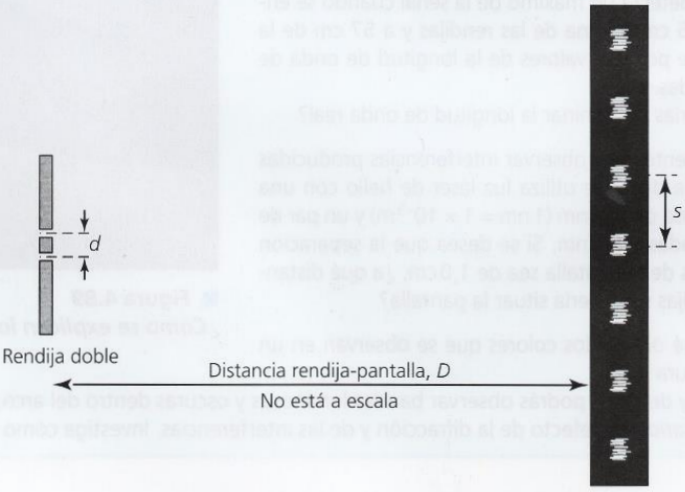


Figura 4.87 *Geometría del experimento con una rendija doble*

La longitud de onda de la luz empleada está relacionada con la geometría del experimento mediante la ecuación (que se explicará en el Capítulo 9):

$$s = \frac{\lambda D}{d}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Ejemplo resuelto

11 Se dirige un haz de luz láser monocromático hacia varias rendijas dobles y se observa el patrón de interferencias sobre una pantalla situada a 5,78 m de las rendijas. La distancia entre el centro de un fleco brillante y el centro de otro situado ocho flecos más allá es 5,8 cm. Calcula la longitud de onda de la radiación si la separación entre las rendijas es 0,33 mm.

$$s = \frac{\lambda D}{d}$$

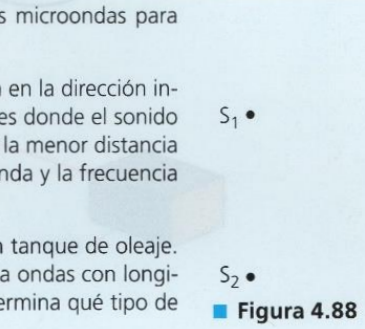
$$\frac{(5{,}8 \times 10^{-2})}{8} = \frac{4{,}78\lambda}{(0{,}33 \times 10^{-3})}$$

$$\lambda = 5{,}0 \times 10^{-7}\,\text{m}$$

55 ¿Por qué en los laboratorios escolares se suelen utilizar las microondas para observar las interferencias de las ondas electromagnéticas?

56 La chica de la Figura 4.85 ha notado que cuando se desplaza en la dirección indicada por las flechas la separación de las sucesivas posiciones donde el sonido es intenso es 50 cm. Los altavoces están separados 120 cm y la menor distancia entre la chica y el punto P es 80 cm. Estima la longitud de onda y la frecuencia de las fuentes.

57 En la Figura 4.88 se representan dos fuentes de ondas en un tanque de oleaje. La escala utilizada en el diagrama es 1:4. Cada fuente genera ondas con longitud de onda 2,8 cm. Toma medidas sobre el diagrama y determina qué tipo de interferencia se producirá en P.



■ **Figura 4.88**

58 Un observador que está situado a medio camino entre dos altavoces enfrentados escucha un sonido intenso de frecuencia 240 Hz.

a Explica por qué disminuye la intensidad del sonido cuando el observador se desplaza en cualquier dirección.

b ¿Cuál es la menor distancia que tendría que desplazarse el observador para escuchar el aumento de la intensidad del sonido nuevamente hasta un máximo? (Velocidad del sonido en aire = 340 m s^{-1}.)

59 Explica por qué no se observa ningún patrón de interferencia cuando se cruzan los haces de luz procedentes de los faros de dos coches.

60 Los centros de las rendijas de la Figura 4.84 están separados 6 cm.

a Sugiere por qué se ha escogido una anchura de rendija comparable en tamaño a la longitud de onda.

b El receptor detecta un máximo de la señal cuando se encuentra a 45 cm de una de las rendijas y a 57 cm de la otra. Sugiere posibles valores de la longitud de onda de las microondas.

c ¿Cómo podrías determinar la longitud de onda real?

61 En un experimento para observar interferencias producidas con una rendija doble se utiliza luz láser de helio con una longitud de onda de 633 nm (1 nm = 1×10^{-9} m) y un par de rendijas separadas 0,50 mm. Si se desea que la separación entre los flecos de la pantalla sea de 1,0 cm, ¿a qué distancia de las rendijas se debería situar la pantalla?



■ **Figura 4.89**
¿Cómo se explican los arcos supernumerarios?

62 **a** Averigua qué origina los colores que se observan en un arco iris (Figura 4.89).

b Si miras muy de cerca podrás observar bandas luminosas y oscuras dentro del arco iris. Estos arcos *supernumerarios* son efecto de la difracción y de las interferencias. Investiga cómo se forman.

Aplicaciones

Uso de las interferencias para el almacenamiento de datos digitales

Los datos digitales se almacenan y se transmiten en forma binaria como series muy largas de 0 y 1 (apagado y encendido). Esto significa que cada ubicación del medio que almacena datos debe poder distinguir entre (solo) dos estados posibles. Los medios de almacenamiento óptico (como los CD, DVD o Blu-ray) emplean las interferencias constructivas y destructivas de luz láser para generar estos dos estados.

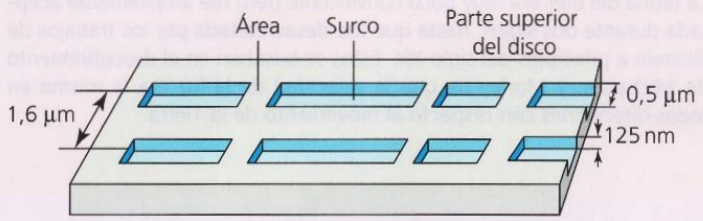


Figura 4.90
Disposición tridimensional de surcos y áreas en una pista de CD (no está a escala). La longitud de los surcos va de 830nm a 3560nm.

Los datos de un CD o un DVD se almacenan en una pista con «surcos» y «áreas» microscópicos que están grabados sobre una capa fina de plástico transparente (Figura 4.90). Estas hendiduras se recubren posteriormente con una capa fina de aluminio reflectante. Los surcos y las áreas están dispuestos uno a continuación del otro sobre una pista con forma espiral que comienza desde el centro del disco.

Para recuperar los datos se enfoca un haz de luz láser sobre la superficie del CD y se refleja en un detector. La reflexión observada depende de si el láser incide sobre un surco o sobre un área. Si incide completamente sobre un surco (o sobre un área) todas las ondas del rayo reflejado están en fase. La interferencia que tiene lugar es constructiva y se detecta una señal intensa (un «uno» binario).

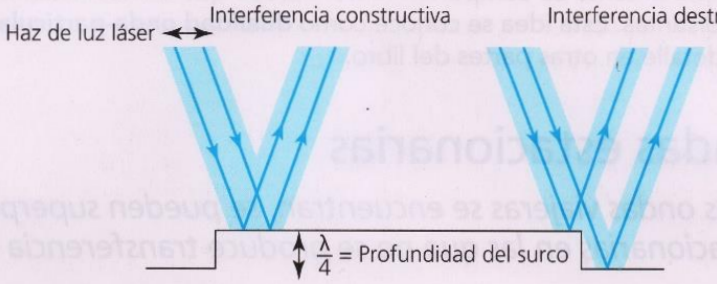


Figura 4.91
Reflexión del haz de luz sobre un surco y sobre un área (en este ejemplo la luz incide en un ángulo determinado pero en un reproductor de CD incide casi perpendicularmente a la superficie del disco)

Si parte del haz de luz láser incide sobre un surco y parte lo hace sobre un área se produce una diferencia de trayectoria entre las dos partes del haz de luz. La profundidad del surco está calculada de modo que si la longitud de onda del haz de luz láser es λ, la diferencia de trayectorias sea $\lambda/2$, de manera que se produce una interferencia destructiva y no se genera señal (un «cero» binario). Como la diferencia de trayectorias es el doble de la profundidad del surco, para obtener una diferencia de trayectorias de $\lambda/2$, la profundidad del surco debe ser = $\lambda/4$.

El haz de luz láser se refleja en la pista espiral rotatoria y la señal recibida por el detector cambia a medida que el haz pasa de surco a área y de nuevo a surco. Se generan así señales digitales de 1 y 0 que varían según si la interferencia es constructiva o destructiva y también según las longitudes de los surcos y las áreas.

Se estima que la capacidad mundial de almacenamiento de datos se duplica cada dos o tres años como consecuencia del interés que tienen las personas en conservar fotografías y videos y el interés que manifiestan las organizaciones en conservar todos los registros de datos posibles. Los datos se almacenan principalmente de forma electrónica, magnética u óptica, aunque son preferibles los pequeños sistemas en estado sólido (sin piezas móviles) SSD (discos duros en estado sólido, por sus siglas en inglés) si su capacidad de almacenamiento es lo bastante grande.

Almacenar información es relativamente sencillo pero no somos conscientes de que eliminarla cuando ya no es útil no es tan simple como pulsar un botón. La información, que puede ser falsa, estar desactualizada o ser simplemente incómoda, puede seguir almacenada y estar a disposición de muchas personas de manera indefinida. Esto es particularmente cierto en el caso de Internet, donde nuestra «huella digital» (los datos que dejamos registrados) puede ser mucho más grande de lo que imaginamos.

1 Compara las ventajas y desventajas de almacenar datos en un disco óptico, un lápiz de memoria, un disco duro externo HDD (o un disco duro en estado sólido SSD) y la «nube».

Enlace con la teoría del conocimiento

Teorías opuestas

Huygens y Newton propusieron dos teorías opuestas sobre el comportamiento de la luz. ¿Cómo decide la comunidad científica entre dos teorías opuestas?

Christiaan Huygens fue un importante científico y matemático holandés que sostenía que las propiedades de la luz conocidas en aquella época (alrededor de 1670), se podían explicar considerando la luz como una onda. Esta idea entraba en conflicto con la teoría de la naturaleza de la luz conocida generalmente como «teoría corpuscular» de Newton. Algunas propiedades de la luz (como la reflexión y la refracción) se podían explicar mediante la teoría de Newton, que asumía que la luz consistía en unas diminutas partículas, mientras que la polarización y la difracción de la luz se podían explicar mediante la teoría ondulatoria de Huygens.

La teoría corpuscular no podía explicar la interferencia de la luz, como demostró Young más de un siglo después, a principios del siglo XIX. Si la luz interfiere, debe tener propiedades ondulatorias, pero todas las demás ondas conocidas necesitaban desplazarse a través de un medio. Por ejemplo, el sonido puede viajar a través del aire pero no a través del vacío, porque no hay moléculas oscilantes que transporten las ondas.

Se atribuye a Descartes el desarrollo del concepto de «éter» unos 150 años antes. El «éter» era una sustancia misteriosa e indetectable que estaba por todas partes, llenando todo el espacio. Los científicos adoptaron esta idea para poder explicar cómo podía viajar la luz a través del espacio. (Descartes había propuesto el éter para explicar cómo podían actuar las fuerzas (magnéticas, gravitatorias, eléctricas) «a distancia» entre los objetos, es decir, sin haber nada en el espacio entre estos).

La teoría del éter era muy poco convincente pero fue ampliamente aceptada durante dos siglos, hasta que fue desacreditada por los trabajos de Einstein a principios del siglo XX. Estos se basaban en el descubrimiento de Michelson y Morley de que la velocidad de la luz era la misma en todas direcciones con respecto al movimiento de la Tierra.

Naturaleza de la ciencia

Dualidad onda-partícula

La naturaleza de la luz ha sido durante siglos un tema central y objeto de debate en el desarrollo de la física. Muchos físicos famosos han propuesto teorías útiles en el pasado, pero ninguna de ellas ha sido enteramente satisfactoria o capaz de explicar todas las propiedades de la luz. Actualmente los científicos aceptan que no existe un único modelo de la naturaleza de la luz que pueda explicar completamente su comportamiento. Parece que se necesitan modelos distintos para circunstancias distintas. Esta idea se conoce como **dualidad onda-partícula** de la luz, la cual se explica con más detalle en otras partes del libro.

4.5 Ondas estacionarias

Cuando las ondas viajeras se encuentran, se pueden superponer para formar ondas estacionarias en las que no se produce transferencia de energía

En este capítulo hemos hablado hasta ahora de *ondas viajeras*, que transfieren energía progresivamente desde una fuente hasta lugares alejados de esta. Ahora centraremos nuestra atención en ondas que permanecen en la misma posición.

Naturaleza de las ondas estacionarias

Consideremos dos ondas viajeras con la misma forma, frecuencia, longitud de onda y amplitud moviéndose en sentidos opuestos, como las que se muestran en la Figura 4.92, que podrían representar las ondas transversales generadas en una cuerda.



Figura 4.92
Dos ondas sinusoidales viajando una hacia la otra

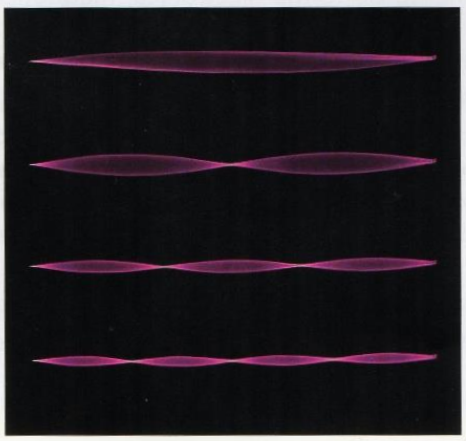


Figura 4.93
Ondas estacionarias en una cuerda tensada

Cuando estas ondas se atraviesan se pueden combinar para producir un patrón de ondas oscilantes que no cambian de posición. Estos patrones se denominan **ondas estacionarias**. Este tipo de patrón se acostumbra a producir en sistemas cerrados, en los que las ondas se reflejan unas en otras repetidamente. En la Figura 4.93 se muestran ejemplos típicos de patrones de ondas estacionarias. Es importante remarcar que la cámara necesita un breve periodo de tiempo para producir una imagen (no se trata de una imagen instantánea), y este es el motivo por el cual la cuerda que se mueve rápidamente aparece borrosa. Lo mismo ocurre cuando vemos la cuerda moviéndose rápidamente con nuestros propios ojos.

Se pueden generar fácilmente patrones simples de ondas estacionarias haciendo oscilar a una frecuencia adecuada uno de los extremos de una cuerda, o de un muelle alargado, mientras otra persona mantiene el otro extremo fijo. Los patrones como los de la Figura 4.93 requieren frecuencias más elevadas (porque un muelle tiene mucha menos masa que una cuerda), pero se pueden generar haciendo vibrar una cuerda tensada mediante un vibrador mecánico controlado por las oscilaciones eléctricas variables procedentes de un **generador de señal**. Este aparato se puede utilizar para estudiar en qué lugares aparece estacionaria la cuerda y para qué frecuencias ocurre.

Nodos y antinodos

En una onda estacionaria hay puntos donde el desplazamiento es *siempre* cero. Estos puntos se denominan **nodos**. En las posiciones situadas entre los nodos, las oscilaciones de todas las partes del medio están *en fase*, pero la amplitud puede variar. A medio camino entre dos nodos la amplitud es máxima. Estas posiciones se denominan **antinodos**. En la Figura 4.94 se representa esquemáticamente la tercera onda de la fotografía de la Figura 4.93. Observemos que la distancia entre dos nodos (o antinodos) consecutivos es una longitud de onda.

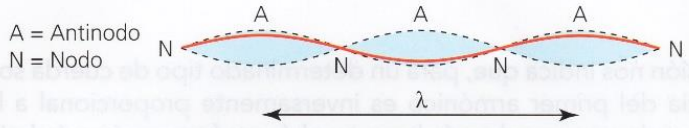


Figura 4.94
Nodos y antinodos en una onda estacionaria en una cuerda tensada – la línea sólida representa una posible posición de la cuerda en un instante determinado

Una onda estacionaria lleva asociada una energía, de manera que en ausencia de fuerzas disipativas, la oscilación continuaría indefinidamente. Sin embargo, la onda estacionaria no *transfiere* energía fuera del sistema.

Podemos describir la formación de un patrón de ondas estacionarias mediante la determinación de la resultante en cada lugar e instante de tiempo. Para ello podemos utilizar el *principio de superposición*. El desplazamiento total es la suma de los dos desplazamientos individuales en cada momento. Los nodos se producen en lugares donde las dos ondas están *siempre* en contrafase. En el resto de lugares, el desplazamiento oscila entre cero y un valor máximo que depende de la diferencia de fase. En los antinodos las dos ondas están siempre en fase. (Es recomendable que los estudiantes utilicen simulaciones por ordenador para ilustrar este concepto, variable dependiendo del instante en el que se analiza).

Se pueden producir ondas estacionarias con cualquier tipo de onda que se mueva en una, dos o tres dimensiones. Por simplicidad, en este apartado trabajaremos únicamente con ondas unidimensionales, como las ondas transversales en una cuerda tensada.

Condiciones de frontera

Las ondas estacionarias se producen frecuentemente cuando las ondas se reflejan de forma repetida en las fronteras de un espacio limitado, como las ondas en una cuerda o el aire en un tubo. Las frecuencias de las ondas estacionarias dependen de la naturaleza del extremo de la cuerda o del extremo del tubo. Son las denominadas **condiciones de frontera**. Por ejemplo, los extremos de una cuerda se pueden fijar en una posición determinada, o bien se pueden dejar libres; los extremos de un tubo pueden estar abiertos o cerrados. Cuando los extremos se pueden mover libremente podemos esperar que la onda estacionaria tenga antinodos, y cuando los extremos están fijos podemos esperar que tenga nodos.

Modos de vibración de ondas transversales en cuerdas

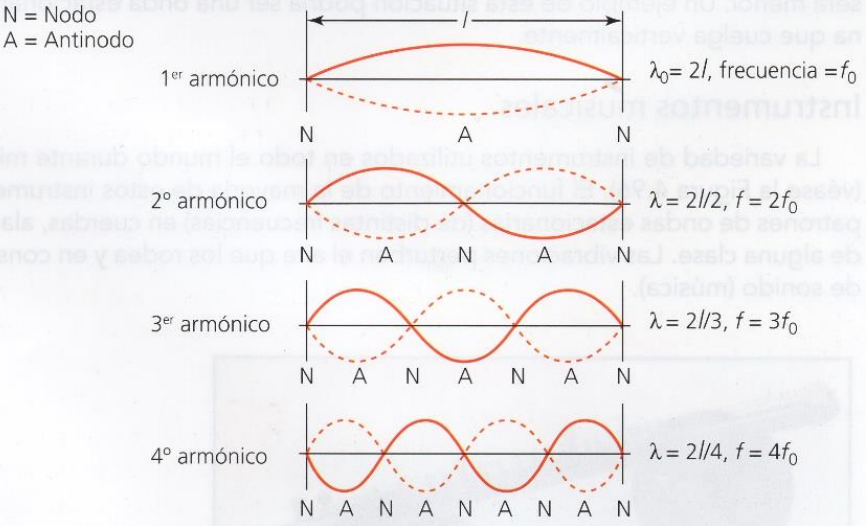


Figura 4.95
Modos de vibración de una cuerda tensa fijada por ambos extremos

Si tiramos de una cuerda tensa fijada por ambos extremos, la cuerda solo puede vibrar en forma de onda estacionaria con nodos en ambos extremos. La manera más simple en que puede vibrar se muestra en la parte superior de la Figura 4.95 y se denomina **primer armónico**. (A veces también se le llama *modo fundamental* de vibración). Normalmente es el modo de vibración más importante, pero al mismo tiempo se pueden producir toda una serie de armónicos, algunos de los cuales

se muestran en la Figura 4.95. La longitud de onda, λ_0, del primer armónico es $2l$, donde l es la longitud de la cuerda. La velocidad de la onda, v, a lo largo de la cuerda depende de la tensión y de la masa por unidad de longitud. La frecuencia del primer armónico, f_0, se puede calcular a partir de $v = f\lambda$:

$$f_0 = \frac{v}{\lambda_0}$$

$$= \frac{v}{2l}$$

Esta expresión nos indica que, para un determinado tipo de cuerda sometida a tensión constante, la frecuencia del primer armónico es inversamente proporcional a la longitud del muelle. El primer armónico de una cuerda más larga tendrá una frecuencia más baja.

Las longitudes de onda de los armónicos empezando por el primero (el más largo) son $2l, \frac{2l}{2}, \frac{2l}{3}, \frac{2l}{4}$, etc.

Las frecuencias correspondientes, empezando por la más baja, son f_0, $2f_0$, $3f_0$, $4f_0$, etc.

Ejemplo resuelto

12 Una cuerda tiene una longitud de 1,2 m y la velocidad de las ondas transversales es 8,0 ms^{-1}.

a ¿Cuál es la longitud de onda del primer armónico?

b Dibuja esquemáticamente los cuatro primeros armónicos.

c ¿Cuál es la frecuencia del tercer armónico?

a $\lambda_0 = 2l = 2 \times 1{,}2 = 2{,}4\,m$

b Véase la Figura 4.95.

c $\lambda = \frac{2{,}4}{3} = 0{,}8\,m$

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{8{,}8}{0{,}8} = 10\,Hz$$

Las ondas estacionarias en cuerdas se obtienen normalmente entre extremos fijados, pero es posible que una de las fronteras, e incluso las dos, se dejen libres. Si hay antinodos en cada frontera, la frecuencia del primer armónico será la misma que para fronteras fijas, con nodos en cada extremo. Si hay un nodo en un extremo y un antinodo en el otro, la frecuencia del primer armónico será menor. Un ejemplo de esta situación podría ser una onda estacionaria producida en una cadena que cuelga verticalmente.

Instrumentos musicales

La variedad de instrumentos utilizados en todo el mundo durante miles de años es asombrosa (véase la Figura 4.96). El funcionamiento de la mayoría de estos instrumentos utiliza la creación de patrones de ondas estacionarias (de distintas frecuencias) en cuerdas, alambres, superficies o tubos de alguna clase. Las vibraciones perturban el aire que los rodea y en consecuencia se emiten ondas de sonido (música).

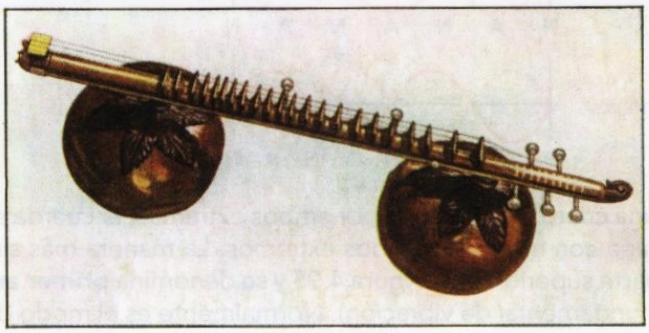


Figura 4.96
Una vina, un antiguo instrumento indio construido con bambú y dos calabazas

Cuando se interpretan notas musicales en instrumentos de cuerda, como guitarras, violoncelos y pianos, las cuerdas vibran principalmente en el primer armónico, pero también suenan otros armónicos. Esta es una de las razones por las que cada instrumento tiene su propio e inconfundible sonido. En la Figura 4.97a se muestra el rango de frecuencia que se puede obtener con una cuerda de guitarra que vibra con un primer armónico de 100 Hz. Los factores que afectan a la frecuencia del primer armónico son la longitud de la cuerda, la tensión y la masa por unidad de longitud. Por ejemplo, la nota Do central (C4) tiene una frecuencia de 261,6 Hz. Las ondas transversales estacionarias de una cuerda que vibra, se utilizan para hacer que el resto de los instrumentos musicales oscilen a la misma frecuencia. Cuando las superficies que vibran golpean el aire que les rodea, se generan ondas de sonido longitudinales que se propagan desde el instrumento hasta nuestros oídos.

Para fomentar la discusión en grupo puede ser interesante que los alumnos traigan distintos instrumentos musicales al laboratorio con el objeto de comparar cómo se generan los sonidos y cómo se controlan las frecuencias. El análisis de frecuencias puede ser particularmente interesante (como el de la Figura 4.97a). Y a la inversa, existen programas de ordenador que permiten la síntesis de sonidos mediante la suma (superposición) de formas de onda elementales.

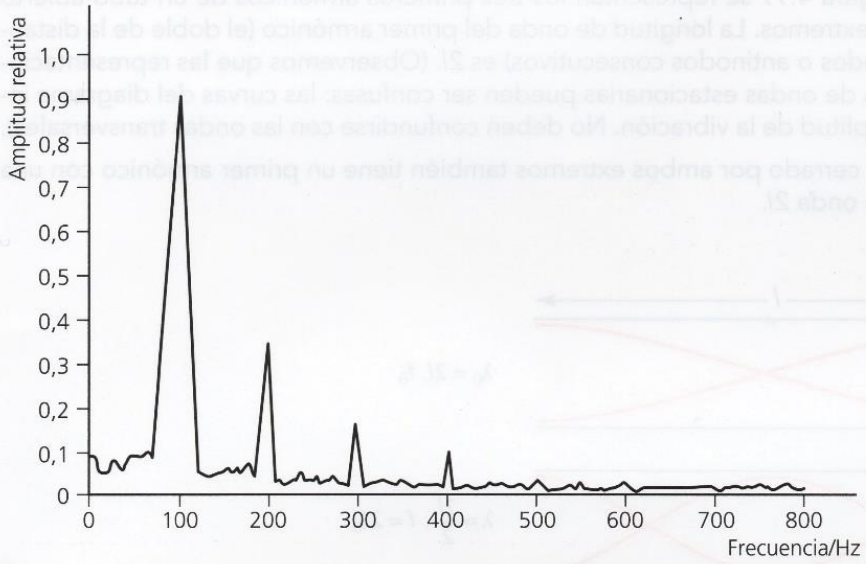


Figura 4.97a
Espectro de frecuencias de una cuerda de guitarra



Figura 4.97b
Creación de ondas estacionarias con un violoncelo

Enlace con la teoría del conocimiento

Comprender lo que no vemos requiere imaginación

Las ondas estacionarias generadas en cuerdas están estrechamente ligadas a la teoría de Schrodinger sobre la probabilidad de la amplitud asociada a la función de onda de los electrones atómicos. La aplicación a la teoría de supercuerdas requiere patrones de ondas estacionarias en 11 dimensiones. ¿Cuál es el papel que desempeñan la razón y la imaginación en la habilidad de los científicos para visualizar escenarios que están más allá de nuestras capacidades físicas?

Las ondas estacionarias en cuerdas solo pueden vibrar en una serie de frecuencias determinadas que además están relacionadas matemáticamente. Cuando se descubrió que el electrón de un átomo de hidrógeno solo puede estar en unos determinados niveles de energía relacionados matemáticamente, se concluyó que la teoría de las ondas estacionarias se podía aplicar también a los átomos. Sin embargo, no implica que existan similitudes físicas entre cuerdas y electrones.

Naturaleza de la ciencia

Procesos de razonamiento común

La conexión entre las notas musicales simples y las matemáticas se conoce desde hace más de 2000 años. Se suele atribuir a Pitágoras ser el primero en reconocer esta relación aproximadamente en el año 600 a.C. Exista o no esta relación, la «Música de las Esferas» fue una filosofía muy arraigada y visionaria que buscaba encontrar patrones numéricos y armonías, no solo en la música sino en el mundo en general y también en las observaciones astronómicas.

Se pueden encontrar ideas relativas a las ondas estacionarias a lo largo de un periodo de más de 2500 años, desde los antiguos instrumentos musicales hasta las últimas *teorías de supercuerdas* englobadas en la *teoría del todo*, pasando por la disposición de los electrones en los átomos. Es un tema común de las diversas áreas de conocimiento de la ciencia: una terminología compartida y un **proceso de razonamiento común** se desarrollan y evolucionan a lo largo del tiempo. Cuando nos enfrentamos a un nuevo descubrimiento o innovación, nuestro instinto natural nos lleva a interpretarlo en términos del conocimiento existente.

Ondas estacionarias de sonido generadas en tubos

Se pueden generar ondas de sonido longitudinales estacionarias haciendo vibrar el aire en diversos recipientes y tubos. El sonido que se produce al soplar a través de la boca de una botella vacía es un ejemplo cotidiano. Muchos instrumentos musicales, como la flauta y el clarinete, basan su funcionamiento en esta misma idea. Por simplicidad, consideraremos únicamente las ondas generadas en *tubos* uniformes (también llamados *columnas* de aire).

Como sucede en el caso de las cuerdas, para saber qué longitudes de onda y qué frecuencias se pueden producir, necesitamos tener en cuenta la longitud del tubo y las condiciones de frontera.

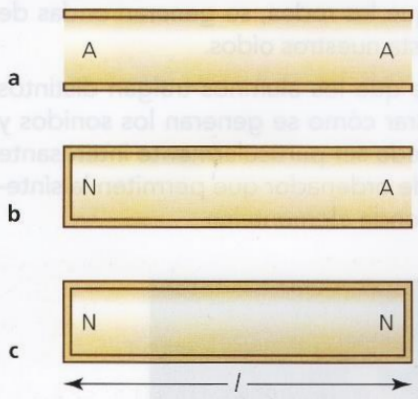


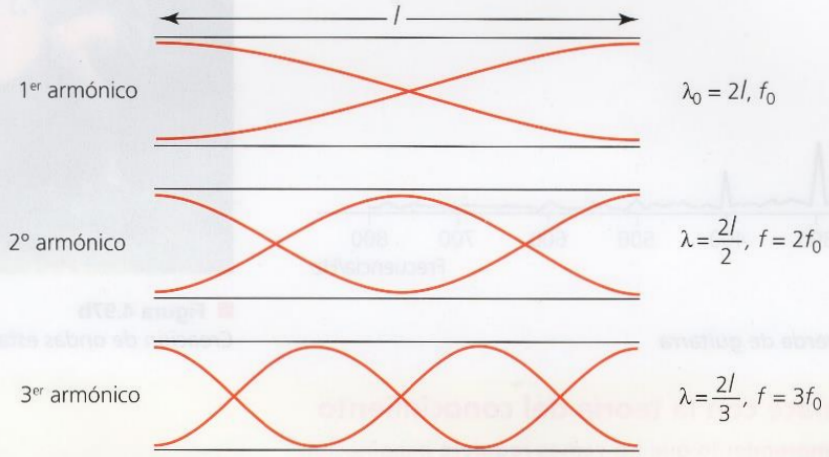
Figura 4.98
Nodos y antinodos en los extremos de tubos abiertos y cerrados

Como ilustración de esto último consideremos la Figura 4.98. En el diagrama **a** el tubo está abierto por ambos extremos, por tanto debe haber antinodos, A, en los extremos y al menos un nodo en medio. En el diagrama **b** el tubo está abierto por un extremo (antinodo) y cerrado por el otro (nodo, N). En el diagrama **c** el tubo está cerrado por ambos extremos, de modo que debe haber nodos en los extremos y al menos un antinodo en medio.

En la Figura 4.99 se representan los tres primeros armónicos de un tubo abierto por ambos extremos. La longitud de onda del primer armónico (el doble de la distancia entre nodos o antinodos consecutivos) es $2l$. (Observemos que las representaciones gráficas de ondas estacionarias pueden ser confusas: las curvas del diagrama indican la amplitud de la vibración. No deben confundirse con las ondas transversales).

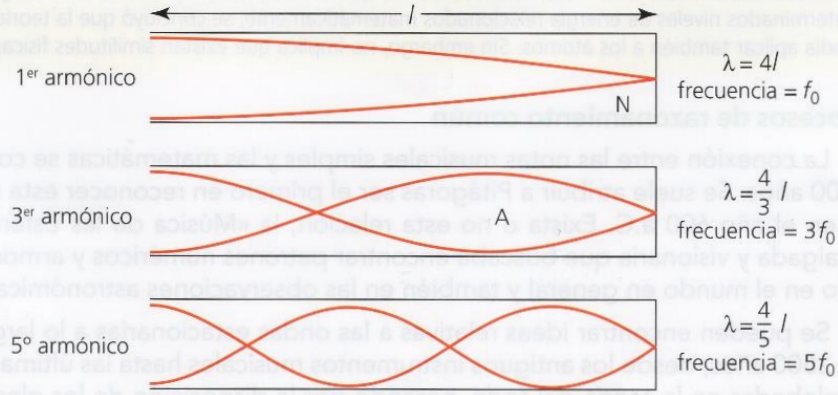
Un tubo cerrado por ambos extremos también tiene un primer armónico con una longitud de onda $2l$.

Figura 4.99
Los primeros tres armónicos de un tubo abierto por ambos extremos



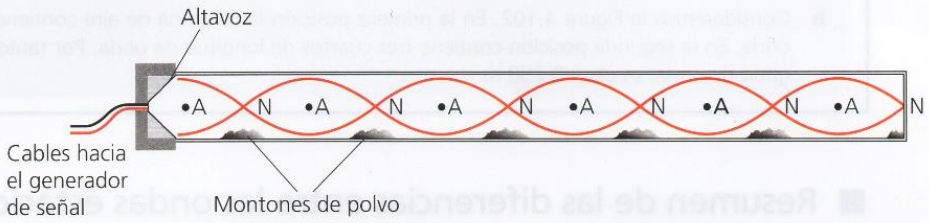
En la Figura 4.100 se representan los tres primeros armónicos posibles de un tubo abierto por un extremo y cerrado por el otro. En estas circunstancias solo son posibles los armónicos impares. El primer armónico tiene una longitud de onda de $4l$.

Figura 4.100
Armónicos de un tubo abierto por un extremo



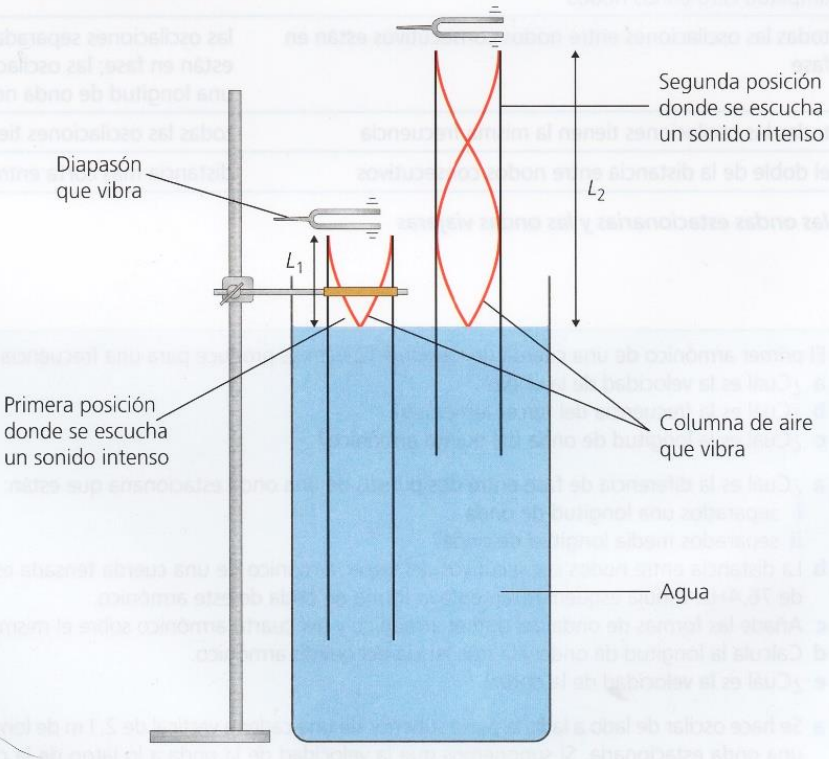
En la Figura 4.101 se muestra un posible experimento para observar ondas estacionarias de sonido. Se coloca un altavoz cerca del extremo abierto de un tubo largo transparente con el otro extremo cerrado. Se esparce polvo a lo largo del tubo, de manera que cuando se enciende el altavoz y se ajusta cuidadosamente la frecuencia, se observa que el polvo se amontona. Este fenómeno se debe a que el polvo tiende a desplazarse desde lugares donde hay mucha vibración (antinodos) hacia lugares donde no hay vibración (nodos).

Figure 4.101 *Experimento para observar ondas estacionarias de sonido con un altavoz*



Para observar ondas estacionarias en el aire del interior de un tubo se puede emplear un **diapasón**, como se muestra en la Figura 4.102. Se fija un diapasón que vibra en el extremo abierto de un tubo, que está abierto por arriba y cerrado por abajo al nivel del agua. Se aumenta progresivamente la altura del tubo por encima del agua hasta que se escucha un sonido intenso, que se produce cuando la frecuencia del diapasón coincide con la frecuencia del primer armónico de la columna de aire. Si se vuelve a aumentar la altura del tubo por encima del agua se pueden escuchar más armónicos.

Figura 4.102 *Experimento para observar ondas estacionarias con un diapasón*



En este experimento se pueden realizar medidas que permiten determinar la velocidad del sonido. Y al contrario, si se conoce la velocidad del sonido en el aire, el experimento puede servir para determinar la frecuencia del diapasón.

Ejemplo resuelto

13 a Si el diapasón de la Figura 4.102 vibra a una frecuencia de 659 Hz, calcula la longitud L_1. (Considera que la velocidad del sonido en aire es $340\,m\,s^{-1}$.)

b ¿Hasta qué altura hay que elevar el tubo para obtener la siguiente posición en la que se escucha un sonido intenso?

a

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340}{659} = 0{,}516\,m$$

Esta longitud de onda corresponde al cuádruple de la longitud del tubo (véase Figura 4.100).

Por tanto,

$$L_1 = \frac{0{,}516}{4} = 0{,}129\,\text{m}$$

En realidad se trata de una respuesta aproximada porque los antinodos no se producen exactamente en los extremos abiertos de los tubos. (Si se requiere una respuesta más exacta, para el cálculo se puede realizar una «corrección por extremo» que está asociada al diámetro del tubo).

b Consideremos la Figura 4.102. En la primera posición la columna de aire contiene un cuarto de longitud de onda. En la segunda posición contiene tres cuartos de longitud de onda. Por tanto, se ha elevado media longitud de onda, es decir 0,258 m.

Resumen de las diferencias entre las ondas estacionarias y las ondas viajeras

	Ondas estacionarias	Ondas viajeras
Patrón de onda	inmóvil (estacionario)	viajero (progresivo)
Transferencia de energía	no hay transferencia de energía	se transfiere energía a través del medio
Amplitud (suponiendo que no hay disipación de energía)	la amplitud en cada lugar es constante pero varía con la posición entre nodos; amplitud máxima en los antinodos, amplitud cero en los nodos	todas las oscilaciones tienen la misma amplitud
Fase	todas las oscilaciones entre nodos consecutivos están en fase	las oscilaciones separadas una longitud de onda están en fase; las oscilaciones separadas menos de una longitud de onda no están en fase
Frecuencia	todas las oscilaciones tienen la misma frecuencia	todas las oscilaciones tienen la misma frecuencia
Longitud de onda	el doble de la distancia entre nodos consecutivos	distancia más corta entre puntos en fase

Tabla 4.3 *Comparación entre las ondas estacionarias y las ondas viajeras*

63 El primer armónico de una cuerda de longitud 123 cm se produce para una frecuencia de 23,8 Hz.
- **a** ¿Cuál es la velocidad de la onda?
- **b** ¿Cuál es la frecuencia del tercer armónico?
- **c** ¿Cuál es la longitud de onda del quinto armónico?

64 **a** ¿Cuál es la diferencia de fase entre dos puntos de una onda estacionaria que están:
- **i** separados una longitud de onda
- **ii** separados media longitud de onda?

b La distancia entre nodos consecutivos del tercer armónico de una cuerda tensada es 18,0 cm, con una frecuencia de 76,4 Hz. Dibuja esquemáticamente la forma de onda de este armónico.
c Añade las formas de onda del primer armónico y del cuarto armónico sobre el mismo esquema anterior.
d Calcula la longitud de onda y la frecuencia del quinto armónico.
e ¿Cuál es la velocidad de la onda?

65 **a** Se hace oscilar de lado a lado la parte superior de una cadena vertical de 2,1 m de longitud con el objeto de generar una onda estacionaria. Si suponemos que la velocidad de la onda a lo largo de la cadena es constante con valor $5{,}6\,\text{m}\,\text{s}^{-1}$, ¿qué frecuencia se necesita para producir el segundo armónico?
b En realidad la velocidad de la onda a lo largo de la cadena *no* es constante y como consecuencia de ello la onda estacionaria tiene una longitud de onda variable. Sugiere un motivo por el que la velocidad no es constante.

66 Una cuerda de guitarra tiene el primer armónico en una frecuencia de 262 Hz.
- **a** Sugiere qué le ocurre a la velocidad de las ondas cuando se aumenta la tensión de la cuerda.
- **b** Si se ajusta la cuerda de manera que la velocidad de la onda aumente, explica qué le sucede a la frecuencia del primer armónico.
- **c** Sugiere por qué una onda viaja más lentamente por una cuerda más gruesa (suponiendo el mismo material y que esté sometida a la misma tensión).
- **d** Explica por qué las cuerdas más gruesas (suponiendo el mismo material, la misma longitud y la misma tensión) producen notas de frecuencia más baja.

67 Dibuja esquemáticamente los tres primeros armónicos de un tubo cerrado por ambos extremos.

68 Los tubos A y B son similares y tienen la misma longitud. El tubo A está cerrado por un extremo y el tubo B está abierto por ambos extremos. Si la frecuencia del primer armónico de A es 180 Hz, ¿cuál es la frecuencia del primer armónico de B?

69 Si la frecuencia utilizada en el experimento de la Figura 4.101 es 6,75 kHz y los montones de polvo están separados 2,5 cm, ¿cuál es la velocidad de las ondas de sonido?

70 ¿Qué longitud debe tener el tubo de un órgano (abierto por un extremo, véase Figura 4.103) para producir un armónico de frecuencia 90 Hz? (Utiliza velocidad del sonido = 340 $m s^{-1}$)

71 Un tubo de órgano abierto por ambos extremos tiene un segundo armónico de frecuencia 228 Hz.
- **a** ¿Cuál es su longitud?
- **b** ¿Cuál es la frecuencia del tercer armónico?
- **c** ¿Cuál es la longitud de onda del cuarto armónico?
- **d** Sugiere una ventaja del uso de tubos de órgano cerrados por un extremo frente a los que están abiertos por ambos extremos.

72 **a** En un experimento como el que se muestra en la Figura 4.102 se utiliza un diapasón de frecuencia 480 Hz y se escucha el primer armónico cuando la longitud del tubo es de 18,0 cm. Utiliza estas cifras para determinar un valor de la velocidad del sonido en aire.

b Se repite el experimento con un diapasón distinto de frecuencia desconocida. Si el tercer armónico se escucha cuando la longitud de la columna de aire es 101,4 cm, ¿cuál es la frecuencia del diapasón?

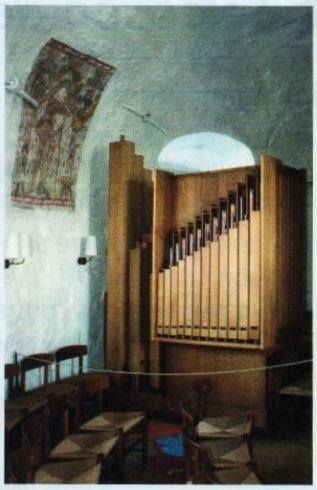


Figura 4.103
En este órgano de iglesia los tubos de madera están abiertos por un extremo y los de metal que hay detrás están abiertos por ambos extremos

Aplicaciones

Diseño de hornos microondas

La frecuencia de las microondas que se utilizan para cocinar alimentos se escoge de manera que las microondas sean absorbidas por el agua y otras moléculas polares de los alimentos. Estas moléculas están cargadas positivamente en un extremo y negativamente en el otro. El campo electromagnético oscilante de las microondas hace vibrar las moléculas de los alimentos y produce un aumento de su energía cinética, lo que se traduce en que el alimento se calienta. La mayoría de los hornos microondas funcionan a una frecuencia de 2,45 GHz. Esta frecuencia de radiación es penetrante, lo que significa que el alimento no se cocina solo superficialmente.

Las paredes, el suelo y el techo del horno son metálicos para asegurar que las microondas no atraviesen el horno y salgan al exterior. La puerta puede tener una malla metálica (con orificios) que refleja las microondas pero permite el paso de la luz (a causa de su longitud de onda mucho menor), lo que permite visualizar el contenido del horno desde fuera.

Las microondas se reflejan en las paredes del horno y por tanto estas no absorben energía, como sí ocurre en otros tipos de hornos. El efecto «captura» de las microondas es el principal motivo por el que este tipo de hornos permiten cocinar de forma muy rápida y eficiente. Sin embargo, las microondas reflejadas en las paredes se pueden combinar para producir diversos tipos de ondas estacionarias en el interior del horno, lo que puede dar lugar a que los alimentos se cocinen de manera desigual. Para reducir este efecto se pueden «remover» las microondas mediante un deflector giratorio cuando entran en el espacio de cocción, o bien se puede colocar el alimento sobre un plato giratorio, o bien se puede remover el alimento a mano.

1. Calcula la longitud de onda de las microondas que se utilizan para cocinar.
2. Diseña un experimento para estudiar la presencia significativa de nodos y antinodos en un horno microondas. ¿Qué separación entre nodos cabe esperar?

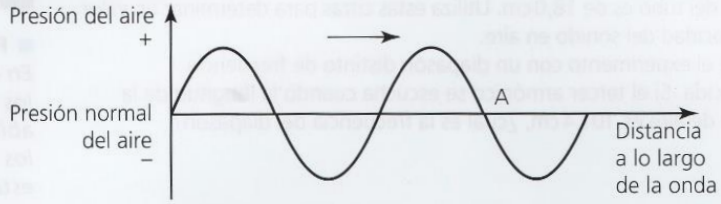
Selección de preguntas de examen

Hoja 1 preguntas del IB y preguntas tipo IB

1 Una onda transversal viaja por una cuerda tensada. Consideremos dos puntos de la cuerda que están separados exactamente una longitud de onda. Las velocidades de la cuerda en estos dos puntos siempre:

A. son iguales entre sí
B. son constantes
C. tienen sentidos contrarios
D. están en una dirección paralela a la dirección de desplazamiento de la onda.

2 En esta gráfica se representa una onda de sonido desplazándose por el aire. La onda se desplaza en la dirección y sentido indicados por la flecha. Consideremos el punto A.



La presión del aire en A:

A. es cero
B. es siempre constante
C. está a punto de aumentar
D. está a punto de disminuir.

3 Una onda progresiva transversal se transmite a través de un medio. La mejor descripción de la velocidad de la onda es:

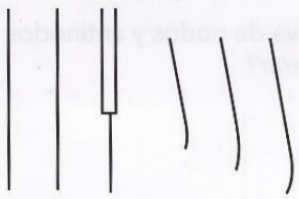
A. la velocidad a la que se transfiere la energía
B. la velocidad media de las partículas que oscilan en el medio
C. la velocidad del medio
D. la velocidad de la fuente de las ondas.

4 Las ondas luminosas de longitud de onda λ, frecuencia f y velocidad de desplazamiento c inciden sobre un material transparente con índice de refracción 1,6. ¿Cuál de las combinaciones siguientes describe las propiedades ondulatorias de las ondas luminosas transmitidas?

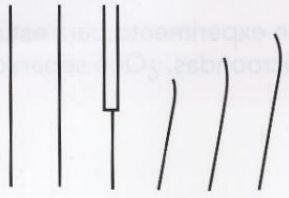
A. longitud de onda $1{,}6\lambda$; velocidad c
B. frecuencia $1{,}6f$; velocidad $\frac{c}{1{,}6}$
C. longitud de onda $\frac{\lambda}{1{,}6}$; frecuencia f
D. longitud de onda λ; velocidad $\frac{c}{1{,}6}$

5 Cuando los frentes de onda planos encuentran un obstáculo pueden experimentar una difracción. ¿Cuál de los diagramas siguientes representa mejor este efecto?

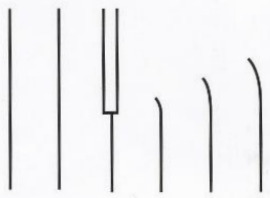
A.



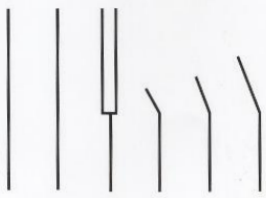
B.



C.



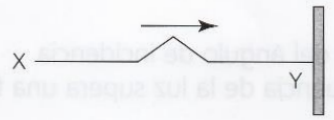
D.



6 ¿Cuál de las definiciones siguientes se puede aplicar a la longitud de onda de una onda transversal progresiva (viajera)?

A. la distancia entre dos crestas cualesquiera de la onda
B. la distancia entre una cresta y un valle contiguo
C. la amplitud de una partícula de la onda durante una oscilación de la fuente
D. la distancia que se desplaza un frente de onda durante una oscilación de la fuente.

7 En este diagrama se representa un pulso que se desplaza por una cuerda desde X a Y. El extremo Y de la cuerda está atado a un soporte fijo

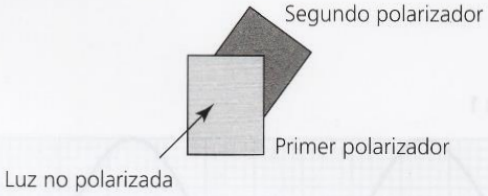


Cuando el pulso llega al extremo Y:

A. desaparece
B. provoca la oscilación hacia arriba y hacia abajo del extremo Y de la cuerda
C. se refleja y se invierte
D. se refleja y no se invierte.

© IB Organization

8 Sobre un polarizador incide luz no polarizada de intensidad I_0. La luz transmitida incide a continuación sobre un segundo polarizador. El eje del segundo polarizador forma un ángulo de 60° con el eje del primer polarizador.



El coseno de 60° es $\frac{1}{2}$. La intensidad de la luz transmitida a través del segundo polarizador es:

A. I_0 **B** $\frac{I_0}{2}$ **C** $\frac{I_0}{4}$ **D** $\frac{I_0}{8}$

© IB Organization

9 ¿Cuál de las expresiones siguientes describe las ondas estacionarias de una cuerda tensada?

A. Todos los puntos de las ondas se desplazan con la misma amplitud.
B. Todos los puntos de las ondas se desplazan con la misma fase.
C. Todos los puntos de las ondas se desplazan con la misma frecuencia.
D. La longitud de onda es la distancia entre antinodos consecutivos.

10 Una fuente de sonido que emite a una única frecuencia se coloca sobre el extremo superior de un tubo que está lleno de agua. Cuando se deja salir el agua del tubo se escucha un sonido intenso por primera vez cuando el agua está cerca del fondo del tubo, tal como se representa en todos los diagramas. ¿Cuál de estos diagramas representa mejor el patrón de ondas estacionarias que ha producido este sonido intenso?

A.


B.


C.


D.


11 La intensidad de un sonido a una distancia de 2 m de una fuente puntual es $1{,}8 \times 10^{-4}\,\mathrm{W\,m^{-2}}$. ¿Cuál de los valores siguientes estima mejor la intensidad ($/10^{-4}\,\mathrm{W\,m^{-2}}$) a 6 m de la fuente? Supongamos que no hay absorción del sonido en el aire.

A. 0,9 **B.** 0,6 **C.** 0,3 **D.** 0,2

12 La luz reflejada sobre una superficie se puede polarizar parcialmente. ¿Cuál de las afirmaciones siguientes sobre este efecto es correcta?

A. El material debe ser un conductor metálico.
B. El material debe ser transparente.
C. La magnitud de la polarización depende del ángulo de incidencia.
D. El efecto solo se produce cuando la frecuencia de la luz supera una frecuencia umbral.

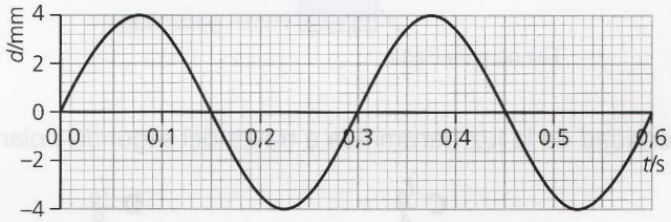
13 La luz que viaja por un medio rodeado por aire puede experimentar en determinadas circunstancias una reflexión interna total. Este efecto solo se produce cuando:

A. el índice de refracción del medio por el que viaja la luz es menor que 1
B. la luz incide sobre la superficie del medio con un ángulo de incidencia mayor que el ángulo crítico
C. la velocidad de la luz en aire es menor que la velocidad de la luz en el medio
D. la luz es monocromática.

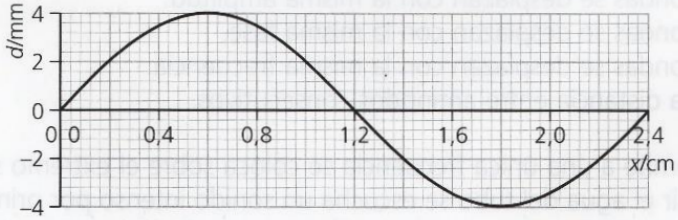
Hoja 2 preguntas del IB y preguntas tipo IB

1 a En la gráfica 1 se representa la variación del desplazamiento *d* de una onda viajera (progresiva) con respecto al tiempo *t*.
En la gráfica 2 se representa la variación del desplazamiento *d* con respecto a la distancia *x* sobre la misma onda.

Gráfica 1

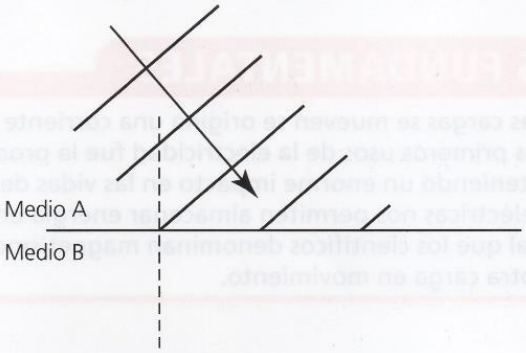


Gráfica 2



i. Enuncia qué se entiende por onda viajera. (1)
ii. Utiliza las gráficas para determinar la amplitud, la longitud de onda, la frecuencia y la velocidad de la onda. (4)

b En este diagrama se representan frentes de onda que inciden sobre una frontera entre dos medios A y B.



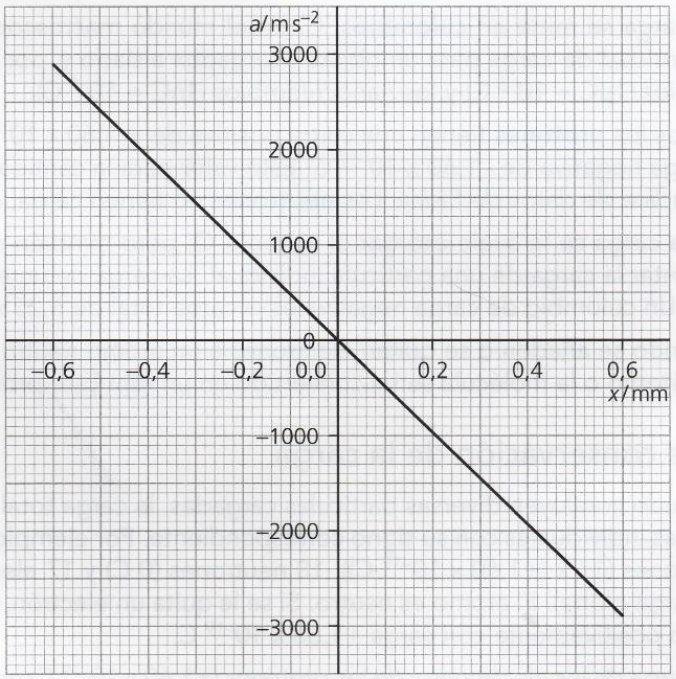
El cociente índice de refracción del medio B/índice de refracción del medio A es 1,4.
El ángulo que forma un frente de onda incidente con la normal a la superficie es 50°.

i Calcula el ángulo que forma un frente de onda refractado con la normal a la frontera. (3)

ii Copia el diagrama y dibuja tres frentes de onda para representar la refracción de la onda en la frontera. (3)

© IB Organization

2 Un objeto vibra en el aire. En el gráfica inferior se representa la variación de la aceleración *a* del objeto con respecto al desplazamiento *x*.



a Enuncia y explica dos razones por las que la gráfica indica que el objeto está describiendo un movimiento armónico simple. (4)

b Demuestra que la frecuencia de oscilación es 350 Hz a partir de los datos de la gráfica. (4)

c El movimiento del objeto origina una onda de sonido progresiva (viajera) longitudinal.

i. Enuncia qué se entiende por onda progresiva longitudinal. (2)

ii. La velocidad de la onda es 330 $m\,s^{-1}$. Calcula su longitud de onda a partir de la respuesta al apartado **b**. (2)

© IB Organization

3 Se genera una onda estacionaria de sonido en una columna de aire de longitud 38 cm y abierta por ambos extremos.

a Describe dos características que diferencian una onda estacionaria de una onda viajera. (2)

b Si la velocidad del sonido es 340 ms^{-1}, ¿cuál es la frecuencia de la onda estacionaria? (2)

5 Electricidad y magnetismo

IDEAS FUNDAMENTALES

- Cuando las cargas se mueven se origina una corriente eléctrica.
- Uno de los primeros usos de la electricidad fue la producción de luz y calor; esta tecnología continúa teniendo un enorme impacto en las vidas de las personas de todo el mundo.
- Las pilas eléctricas nos permiten almacenar energía en forma química.
- El efecto al que los científicos denominan magnetismo surge cuando una carga se desplaza cerca de otra carga en movimiento.

5.1 Campos eléctricos

Cuando las cargas se mueven se origina una corriente eléctrica

Carga

La carga eléctrica es una propiedad fundamental de algunas partículas subatómicas y es la responsable de las fuerzas de interacción entre estas. Como existen dos tipos de fuerzas (atractivas y repulsivas) se necesitan dos tipos de cargas para explicarlas, la **carga positiva** y la **carga negativa**. El hecho de describir las cargas como «positivas» o «negativas» no obedece a ningún criterio en particular, simplemente es una forma de diferenciar dos tipos distintos de una misma cosa.

La carga se mide en **culombios**, C. En el mundo macroscópico, un culombio representa una gran cantidad de carga para un objeto «cargado» aislado y, por tanto, se suelen utilizar los *microculombios* ($1\mu C = 10^{-6}$ C) y los *nanoculombios* ($1nC = 10^{-9}$ C).

Todos los **protones** tienen una carga positiva de $+ 1{,}60 \times 10^{-19}$ C y todos los **electrones** tienen una carga negativa de $-1{,}60 \times 10^{-19}$ C. Este valor para la cantidad fundamental de carga figura en el *Apéndice de datos de Física*. Los **neutrones** no tienen carga, son **neutros**.

A la carga se le suele otorgar el símbolo Q, pero también se suele utilizar el símbolo q para representar la carga de una partícula individual. La carga de un electrón se representa mediante la letra e. Un culombio de carga negativa es la carga total de $6{,}25 \times 10^{18}$ electrones ($1/(1{,}60 \times 10^{-19})$).

Cuando se añaden o se quitan electrones a un átomo neutro (o a una molécula neutra) se dice que el átomo o la molécula se ha convertido en un **ion**. Este proceso se denomina **ionización**.

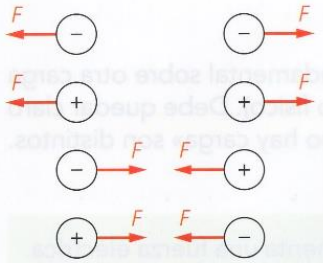
Ley de conservación de la carga

Cuando confluyen diversas partículas cargadas, la carga total se calcula simplemente sumando las cargas individuales con su signo correspondiente. Por ejemplo, un átomo de cloro que contiene 17 protones ($17 \times (+1{,}60 \times 10^{-19}$ C)), 18 neutrones (0 C) y 17 electrones ($17 \times (-1{,}60 \times 10^{-19}$ C)) no tiene carga global. El átomo es neutro. Si se le quita un electrón, en cambio, se convierte en un ion cargado positivamente con carga $+1{,}60 \times 10^{-19}$ C.

La carga de los electrones y de los protones ($\pm 1{,}60 \times 10^{-19}$ C) es la cantidad fundamental de carga. Una partícula libre no puede tener una cantidad de carga inferior a esta cantidad fundamental. Todas las cantidades de carga superiores corresponden a múltiplos de la cantidad fundamental de carga. Por ejemplo, la carga de una partícula puede ser $1{,}6 \times 10^{-19}$ C; $3{,}2 \times 10^{-19}$ C; $4{,}8 \times 10^{-19}$ C, $6{,}4 \times 10^{-19}$ C y así sucesivamente, pero no pueden existir valores intermedios (por ejemplo $2{,}7 \times 10^{-19}$ C). Por esta razón se dice que la carga está **cuantizada**.

La ley de conservación de la carga afirma que la carga total de un sistema aislado permanece constante.

Se cree que el universo contiene cantidades (aproximadamente) iguales de cargas positivas y cargas negativas, de manera que la carga total es cero. Bajo determinadas circunstancias es posible crear o destruir partículas cargadas individuales, pero solo si la carga total del sistema asociado permanece constante.



■ **Figura 5.1** *Fuerzas eléctricas entre cargas iguales y opuestas*

Las leyes de conservación como la anterior constituyen herramientas muy útiles para los físicos. Por ejemplo, si tenemos dos esferas idénticas aisladas de manera que la carga de una de ellas es $4{,}6 \times 10^{-10}$ C y la otra es neutra, cuando entran en contacto la carga se comparte de modo que ambas adquieren una carga de $2{,}3 \times 10^{-10}$ C. La carga total continúa siendo la misma (suponiendo que las esferas sigan estando aisladas). Si las esferas no son idénticas, la carga se seguirá compartiendo, pero no de forma equitativa.

Fuerzas fundamentales entre cargas

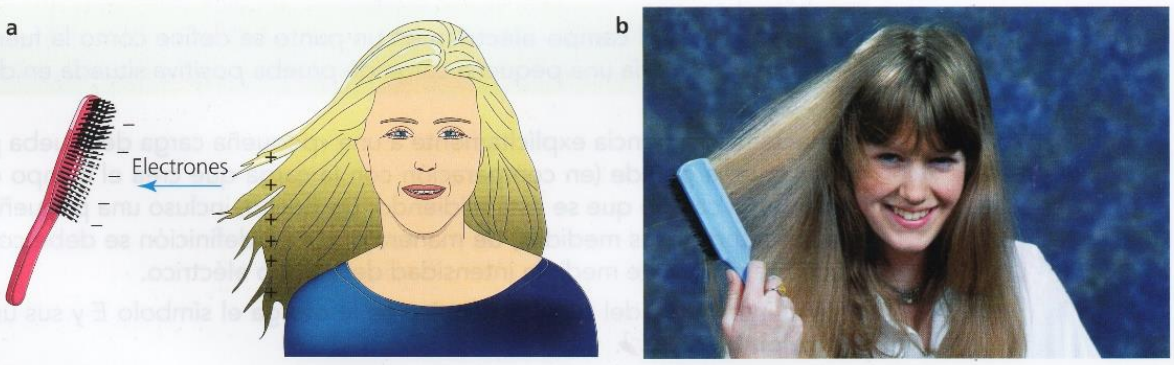
Una partícula con carga positiva *atrae* a una partícula con carga negativa, mientras que dos partículas con el mismo tipo de carga (por ejemplo dos cargas positivas) se *repelen*. Estas fuerzas fundamentales de la naturaleza se denominan **fuerzas eléctricas** y se ilustran en la Figura 5.1.

Las cargas opuestas se atraen; las cargas iguales se repelen.

Carga y descarga

Los objetos de uso diario contienen una enorme cantidad de partículas cargadas (protones y electrones), y el mismo número aproximado de cargas positivas y negativas. Cuando decimos que un objeto (previamente neutro) se ha *cargado* es porque se le ha añadido o quitado un gran número de electrones. La manera más habitual de cargar un objeto es mediante la fricción, como cuando nos cepillamos el cabello seco con un cepillo de plástico, tal como se muestra en la Figura 5.2. Si en este proceso se transfieren electrones, uno de los objetos (como el cepillo) gana electrones y se carga negativamente a costa de quitarle electrones al otro objeto (el cabello), que se queda cargado positivamente. A continuación ambos objetos se atraen. En este ejemplo, los cabellos se repelen porque tienen cargas iguales (positivas). Los protones, a diferencia de los electrones, están localizados en el interior de los núcleos atómicos y no se pueden separar ni mover de sus posiciones, por tanto no pueden producir efectos electrostáticos.

■ **Figura 5.2** *Cuando te cepillas el cabello, la repulsión entre cargas iguales hace que los cabellos se separen*



Los efectos electrostáticos se notan cuando el ambiente es seco y sobre objetos aislantes, más que sobre conductores. (Los conductores y los aislantes se estudiarán en profundidad en este mismo capítulo, véase la página 209). El motivo es que los electrones se mueven rápidamente a través de un conductor metálico para **descargar** un objeto cargado. Para asegurarnos de que no hay carga sobre un objeto establecemos un buen contacto entre el objeto y el suelo. Es lo que se denomina **toma de tierra**.

Los efectos electrostáticos a gran escala pueden ser indeseables e incluso peligrosos. Por ejemplo, los coches y los aviones se pueden cargar mientras se desplazan por el suelo o a través del aire, y esto puede llegar a ser un problema cuando se detienen para repostar combustible, ya que cualquier chispa procedente de un vehículo cargado puede provocar una explosión del combustible y del aire. Este riesgo se puede prevenir comprobando que tanto el vehículo como el surtidor de combustible disponen de una buena toma de tierra.

Campo eléctrico

Hemos visto que una carga cualquiera ejerce una fuerza eléctrica fundamental sobre otra carga cualquiera del espacio que la rodea (sin necesidad de que haya contacto físico). Debe quedar claro que los conceptos «espacio que rodea a una carga» y «espacio donde no hay carga» son distintos. Decimos que existe un **campo eléctrico** en el espacio.

Un campo eléctrico es una región del espacio donde una carga experimenta una fuerza eléctrica.

Análogamente, decimos que existe un campo gravitatorio en una región del espacio donde una masa experimenta una fuerza gravitatoria (véase Capítulo 6). Todos nosotros somos conscientes del campo gravitatorio que rodea la Tierra, pero también vivimos rodeados por campos eléctricos y magnéticos.

En la Figura 5.3 se muestran los resultados de un experimento para la observación del diagrama del campo eléctrico que rodea a dos partículas cargadas. El diagrama se ha obtenido con granos de sémola en aceite. A los lectores les resultará familiar una imagen análoga con campos magnéticos, esta vez obtenida con limaduras de hierro.

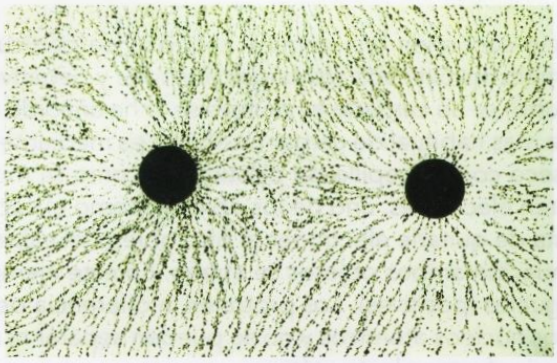


Figura 5.3 *Visualización experimental del diagrama de un campo eléctrico*

La **intensidad del campo eléctrico** en un punto se define como la fuerza por unidad de carga que experimentaría una pequeña carga de prueba *positiva* situada en dicho punto.

Hacemos referencia explícitamente a una «pequeña carga de prueba positiva» porque una carga de prueba grande (en comparación con la carga que crea el campo eléctrico original), podría perturbar el campo que se está midiendo. De hecho, incluso una pequeña carga de prueba afecta a la exactitud de las medidas, de manera que esta definición se debe considerar más teórica que práctica a la hora de medir la intensidad del campo eléctrico.

A la intensidad del campo eléctrico se le otorga el símbolo E y sus unidades son los **newtons por culombio**, N C^{-1}.

$$\text{intensidad del campo eléctrico} = \frac{\text{fuerza eléctrica}}{\text{carga}}$$

$$E = \frac{F}{q}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Se puede establecer un paralelismo entre la intensidad del campo eléctrico y la intensidad del campo gravitatorio, g, que mencionamos brevemente en el Capítulo 2 (g = fuerza gravitatoria/unidad de masa). La intensidad del campo gravitatorio se puede medir fácilmente: basta con determinar el peso de una masa conocida. Análogamente, en principio es fácil estimar la intensidad de un campo eléctrico midiendo directamente la fuerza que actúa sobre una pequeña carga de prueba situada en el campo eléctrico. En la práctica, sin embargo, no es tan fácil porque la fuerza que actúa es muy pequeña y la carga probablemente no se mantiene constante.

La intensidad de un campo es una magnitud *vectorial*; tiene dirección, la propia dirección de la fuerza. En el caso de un campo gravitatorio, la fuerza siempre es atractiva y el sentido es evidente. En cambio, el sentido de la fuerza en un campo eléctrico depende del signo de la carga de prueba. El sentido positivo del campo eléctrico se escoge por convenio como el sentido que correspondería a una fuerza eléctrica actuando sobre una carga *positiva* situada en el campo (según la definición anterior).

Ejemplo resuelto

1 ¿Qué fuerza experimenta una carga de + 6,3 μC situada en un punto donde la intensidad del campo eléctrico es 410 N C^{-1}?

$$E = \frac{F}{q} \text{ por tanto } F = Eq$$

$$F = 410 \times (6{,}3 \times 10^{-6})$$

$$F = 2{,}6 \times 10^{-3}\,\text{N}$$

Combinación de campos eléctricos

Podemos calcular la magnitud del *campo combinado* en cualquier punto de la recta que pasa por dos cargas puntuales simplemente sumando vectorialmente los campos individuales, es decir, teniendo en cuenta sus sentidos. La dirección del campo eléctrico resultante está siempre sobre la línea que une las cargas puntuales. Consideremos la Figura 5.4a, en la que se representan dos cargas positivas, A y B, y una carga de prueba $+q$ en diversas posiciones. El sentido del campo es el sentido de la fuerza que experimenta la carga de prueba positiva. A la izquierda de A, ambos campos actúan en el mismo sentido hacia la izquierda. El campo debido a A probablemente es más intenso, a menos que la carga B sea mucho mayor (en módulo) que la carga A. De forma análoga, a la derecha de B, los campos actúan en el mismo sentido. A la izquierda de A y a la derecha de B la intensidad del campo combinado es mayor que la de los campos individuales.

Entre A y B ambos campos actúan en sentidos contrarios, por tanto debe haber un punto donde el campo eléctrico resultante sea cero. Si ambas cargas tienen el mismo módulo y el mismo signo, esta posición es el punto medio entre ambas cargas. Si una de las cargas es mayor (en módulo) que la otra, el punto donde el campo eléctrico es cero estará cerca de la carga más pequeña.

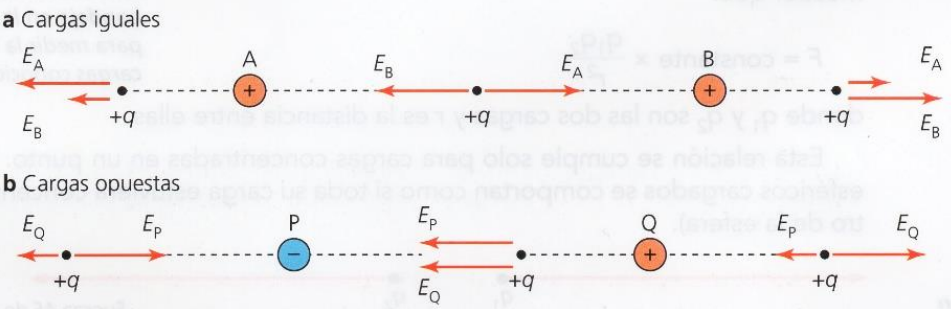


Figura 5.4 *Las flechas representan los campos eléctricos que actúan a lo largo de una línea entre dos cargas puntuales:* **a** *A y B,* **b** *P y Q*

En la Figura 5.4b las dos cargas tienen signos contrarios y, en cualquier punto sobre la línea que las une, los dos campos se combinan para producir un campo eléctrico más intenso que el de los campos individuales. A la izquierda de P y a la derecha de Q, los campos individuales actúan en sentidos contrarios y el campo eléctrico combinado es menor que los campos individuales. Si ambas cargas tienen la misma magnitud el campo combinado nunca se reduce a cero, pero si una de las cargas es mucho mayor (en módulo) que la otra, el campo combinado puede llegar a reducirse a cero.

Los estudios experimentales sobre campos eléctricos en laboratorios escolares son difíciles de llevar a cabo. Es muy recomendable utilizar simulaciones por ordenador como método alternativo porque es una manera rápida y fácil de combinar dos campos eléctricos o más.

1 Describe y explica cualquier efecto electrostático que experimentes en tu vida cotidiana.

2 **a** ¿Cuál es el módulo de la intensidad de un campo eléctrico en un punto donde una carga de prueba de 47 nC experimenta una fuerza de $6{,}7 \times 10^{-5}$ N?
b ¿Cuál sería la fuerza ejercida sobre una carga de 0,28 μC situada en el mismo punto?

3 El valor que se suele atribuir al campo eléctrico cercano a la superficie terrestre es de unos 150 N C^{-1} hacia el centro de la Tierra.
a Calcula la fuerza que actúa sobre un electrón situado en un campo de esta intensidad.
b Compara tu respuesta con la fuerza hacia el centro de la Tierra que ejerce el campo gravitatorio (es decir, el peso del electrón).

4 Sugiere algunos motivos por los que resulta difícil llevar a cabo estudios experimentales sobre campos eléctricos en laboratorios escolares.

5 La intensidad del campo eléctrico en un determinado punto es $2,6 \times 10^6$ N C^{-1} orientado hacia el norte.
a Si este campo se combina con otro de intensidad $4,3 \times 10^6$ N C^{-1} orientado hacia el sur, ¿cuál es la intensidad del campo combinado?
b Determina el módulo del campo eléctrico resultante si sobre el mismo punto actúa un tercer campo de intensidad $3,5 \times 10^6$ N C^{-1} orientado hacia el este.

Ley de Coulomb

Cuanto mayor es la distancia entre dos objetos cargados (o dos partículas cargadas), menor es la fuerza eléctrica entre ellos.

En la Figura 5.5 se muestra un experimento para comprobar la relación entre la fuerza eléctrica y la separación para el caso de dos esferas cargadas. Se dispone de dos esferas cargadas y de una balanza eléctrica con una bandeja en la parte superior. La balanza se utiliza para medir el cambio en la fuerza eléctrica a medida que las esferas se juntan o se separan.

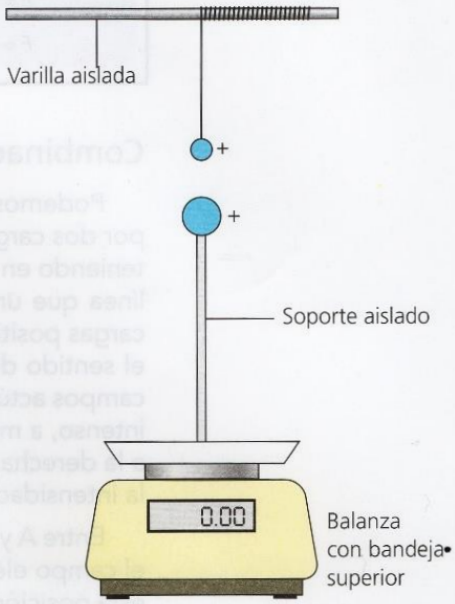


Figura 5.5
Comprobación experimental de la ley de Coulomb mediante una balanza con una bandeja en la parte superior utilizada para medir la fuerza eléctrica entre dos cargas conocidas

Los experimentos confirman que la relación entre la fuerza y la distancia sigue una ley del **inverso del cuadrado de la distancia** (tal como se explicó en el Capítulo 4). Esto es así porque los campos eléctricos que se originan en un punto cargado se propagan equitativamente en todas las direcciones. Esta relación fuerza–distancia se representa mediante vectores en la Figura 5.6.

A partir de experimentos más complejos se puede demostrar que:

$$F = \text{constante} \times \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

donde q_1 y q_2 son las dos cargas y r es la distancia entre ellas.

Esta relación se cumple solo para cargas concentradas en un punto. Sin embargo, los objetos esféricos cargados se comportan como si toda su carga estuviera concentrada en un punto (el centro de la esfera).

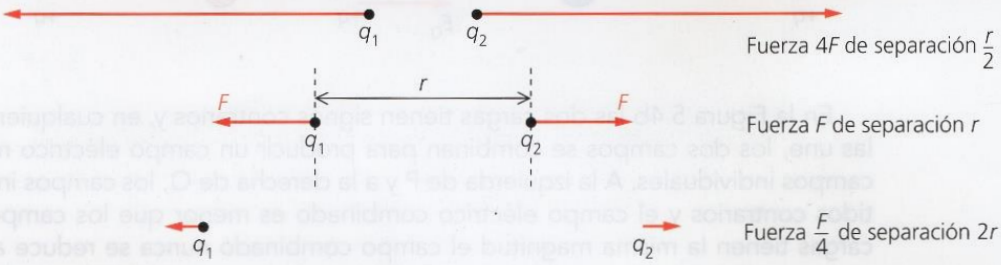


Figura 5.6
La fuerza de repulsión varía con la distancia entre cargas iguales – las flechas no están dibujadas a escala

Si utilizamos el símbolo k para la constante (constante de Coulomb) obtenemos:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Esta expresión se denomina ley de Coulomb y figura en el *Apéndice de datos de Física*, junto con el valor de k (= $8,99 \times 10^9$ N m^2 C^{-2}).

Esta ley fue enunciada por primera vez por Charles Augustin de Coulomb (Figura 5.7) en 1783.



Figura 5.7
El físico francés Charles Augustin de Coulomb (1736–1806)

Ejemplos resueltos

2 ¿Cuál es la fuerza eléctrica que actúa sobre una esfera cargada negativamente (con una carga de 0,82 μC) cuyo centro se encuentra separado 21 cm en aire del centro de otra esfera cargada con +0,47 μC?

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F = \frac{(8{,}99 \times 10^9)\,(8{,}2 \times 10^{-7})\,(4{,}7 \times 10^{-7})}{0{,}21^2}$$

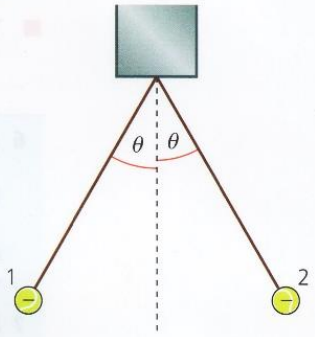
$$F = 0{,}079\,\text{N}$$

Sobre ambas esferas actúa la misma fuerza, pero en sentido contrario.

3 En la Figura 5.8 se representan dos bolas con la misma carga y la misma masa suspendidas del mismo punto. Ambas cuelgan del punto formando un mismo ángulo con la vertical.

Dibuja un diagrama donde se represente lo que sucede si:
a la bola 1 se reemplaza por una bola más pesada pero con la misma carga
b se duplica la carga de la bola 1.

a La bola 1 colgará del punto formando un ángulo menor con la vertical. La bola 2 permanecerá invariable.
b La fuerza sobre ambas bolas será mayor, de modo que colgarán del punto formando un mismo ángulo, mayor, con la vertical.



■ **Figura 5.8**

Permitividad

La constante de Coulomb se expresa también en la forma ampliada que se proporciona a continuación. Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$$

El valor $1/4\pi$ indica la naturaleza radial de la fuerza y ε_0 representa las propiedades eléctricas del espacio libre (el vacío). La constante ε_0 se denomina **permitividad** eléctrica del vacío y su valor es $8{,}85 \times 10^{-12}\ \text{C}^2\ \text{N}^{-1}\ \text{m}^{-2}$ (tal como figura en el *Apéndice de datos de Física*).

Las fuerzas y los campos eléctricos pueden atravesar el vacío. La permitividad del vacío, ε_0, es una constante fundamental que representa la capacidad del espacio vacío para transferir una fuerza eléctrica y un campo eléctrico.

El resto de sustancias tienen permitividades mayores que ε_0, aunque el aire seco tiene propiedades eléctricas similares a las del espacio vacío. Esto significaría que la fuerza eléctrica entre dos cargas en aire se reduciría si el aire se reemplazara por otro medio.

La permitividad de un medio, ε, se divide entre la permitividad del vacío para dar lugar a la **permitividad relativa**, ε_r, del medio. En la Tabla 5.1 se proporcionan algunos ejemplos. (La permitividad relativa se denomina en ocasiones *constante dieléctrica del medio*).

permitividad relativa = permitividad del medio/permitividad del vacío

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

Como se trata de un cociente, la permitividad relativa no tiene unidades. Por ejemplo, si la permitividad de un determinado tipo de caucho es $5{,}83 \times 10^{-11}\ \text{C}^2\ \text{N}^{-1}\ \text{m}^{-2}$, su permitividad relativa será:

$$\frac{5{,}83 \times 10^{-11}}{8{,}85 \times 10^{-12}} = 6{,}59$$

Si utilizamos la permitividad relativa, la ecuación general de la fuerza entre dos cargas en un medio cualquiera se convierte en:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r r^2}$$

Tengamos en cuenta que las dos últimas ecuaciones *no* figuran en el *Apéndice de datos de Física*.

Espacio libre (vacío)	1 (por definición)
aire seco	1,0005
polietileno	2
papel	4
hormigón	4
caucho	6
agua	80

Tabla 5.1 *Permitividades relativas aproximadas de algunos aislantes comunes*

6 **a** ¿Qué separación en aire deben tener dos cargas puntuales de 160 nC para que la fuerza entre ellas sea 1,0 N?
b Si se interpusiera un libro de 1 cm de grosor entre las cargas, ¿aumentaría o disminuiría la fuerza entre ellas? Razona tu respuesta.
c Sugiere un valor aproximado para la nueva fuerza.
d Argumenta por qué no se puede dar un valor exacto en el apartado **c**.

7 El experimento representado en la Figura 5.9 ha sido ideado por un estudiante para intentar observar una fuerza eléctrica de poca magnitud y calcular su valor. A y B son dos esferas con igual carga. La posición de la esfera A es fija, pero la esfera B puede balancearse libremente en el extremo de un hilo fabricado con un material aislante.
a Dibuja un diagrama de cuerpo libre de la esfera B.
b Calcula la fuerza horizontal de repulsión entre A y B que hace que B se aleje de A.
c Calcula la carga de las esferas.

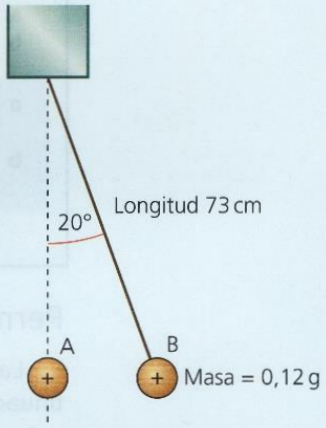


Figura 5.9

8 Calcula la fuerza eléctrica resultante sobre la carga B de la Figura 5.10.

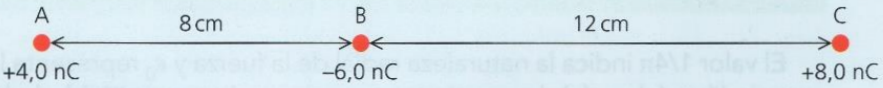


Figura 5.10

9 Cuatro cargas iguales de 0,14 μC están fijadas sobre las esquinas de un cuadrado de lado 25 cm. Calcula la fuerza eléctrica resultante sobre una cualquiera de las cargas.

10 La carga de un protón es $1,6 \times 10^{-19}$ C y la carga de un electrón es $-1,6 \times 10^{-19}$ C. Estima la fuerza eléctrica entre estas dos partículas en un átomo de hidrógeno, suponiendo que estén separadas $5,3 \times 10^{-11}$ m.

11 Explica brevemente cómo utilizarías el mecanismo de la Figura 5.8 para determinar la relación entre la fuerza eléctrica y la distancia de separación entre dos partículas cargadas.

12 La permitividad relativa del gas freón es 2,4. Calcula su permitividad en $C^2\ N^{-1}\ m^{-2}$.

13 Explica por qué en la Tabla 5.1 solo aparecen permitividades relativas de aislantes.

Corriente eléctrica

Cuando las partículas cargadas se desplazan de un lugar a otro (fluyen o circulan) pueden transferir energía útil. Los motores, calentadores y ordenadores permiten convertir esta energía eléctrica en otras formas útiles de energía. El flujo de carga se denomina **corriente eléctrica**. Los cables eléctricos, como los de la Figura 5.11, transfieren grandes cantidades de energía por todos los países.



Figura 5.11
Un poste eléctrico de diseño para el tendido de cables eléctricos

La electricidad tiene la capacidad de ser transmitida y transformada en otras formas de energía de manera que puede mejorar nuestras vidas, pero no debemos perder de vista que cerca de un 20% de la población mundial vive todavía sin tendidos eléctricos que proporcionen electricidad a sus hogares (véase Figura 5.12).

La combustión de petróleo y gas para generar electricidad tiene importantes y duraderas implicaciones (entre las que se encuentra el cambio climático). Este tema candente que nos afecta a todos se trata en profundidad en el Capítulo 8.

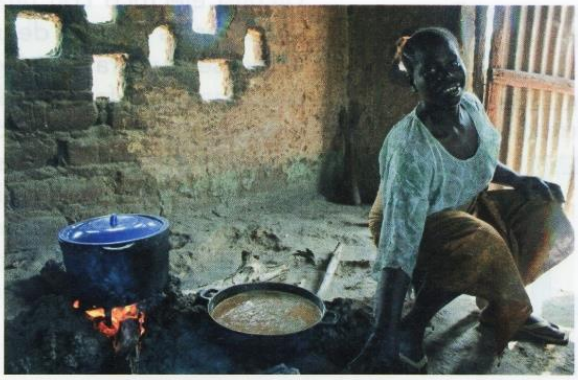


Figura 5.12
Cerca del 20% de la población mundial vive sin red eléctrica

Conductores y aislantes

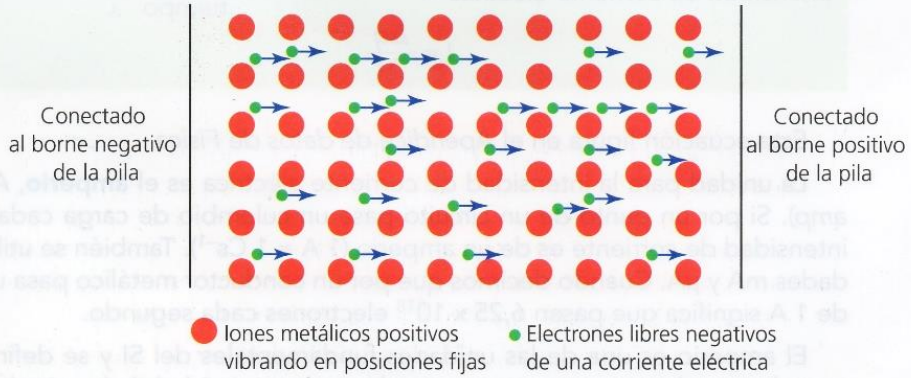
La corriente eléctrica puede fluir a través de un **circuito** eléctrico gracias a que los hilos conductores y los componentes del circuito son buenos **conductores** de la electricidad. Un **aislante** eléctrico es un material a través del cual la corriente no puede fluir con facilidad.

Para que un sólido sea buen conductor es necesario que contenga un gran número de electrones que puedan moverse libremente por todas partes. Los metales son buenos conductores porque contienen un gran número de **electrones libres** (electrones que no están ligados a ningún átomo en particular). Se dice también que estos electrones están **deslocalizados**. Los aislantes tienen relativamente muy pocos electrones libres. Los semiconductores, como el silicio y el germanio, tienen propiedades que están a medio camino entre las de los conductores y las de los aislantes y, lo que es más importante, su capacidad conductora puede ser alterada fácilmente añadiéndoles pequeñas cantidades de impurezas o modificando algunas propiedades externas, como la temperatura o el nivel de luz.

Cuando la mayoría de los sólidos se calientan, las vibraciones cada vez mayores de los átomos, iones o moléculas interfieren en el camino de los electrones que se están moviendo a través del material, lo que hace que se convierta en un peor conductor. Sin embargo, en el caso de los aislantes y de los semiconductores ocurre al revés, ya que la energía interna adicional libera algunos electrones de sus átomos y en consecuencia el material puede convertirse en un mejor conductor.

Los átomos, iones o moléculas de los sólidos no pueden moverse libremente, y como consecuencia no es posible un flujo de cargas positivas, pero la estructura de los metales sí hace posible que algunos electrones se muevan libremente. En la Figura 5.13 se representan electrones libres moviéndose por un metal. Los electrones constituyen una corriente eléctrica que circula a través de un conductor. Los electrones libres se siguen moviendo por todas partes de forma aleatoria y a velocidades muy elevadas, como las moléculas de un gas, incluso cuando no hay flujo de corriente.

Figura 5.13
Flujo de corriente eléctrica a través de un metal



La transferencia de energía en los circuitos eléctricos está asociada al movimiento de electrones. La energía se transfiere desde la batería hacia uno o más componentes del circuito. Estos componentes, a su vez, transforman la energía eléctrica en otra forma de energía útil. Por ejemplo,

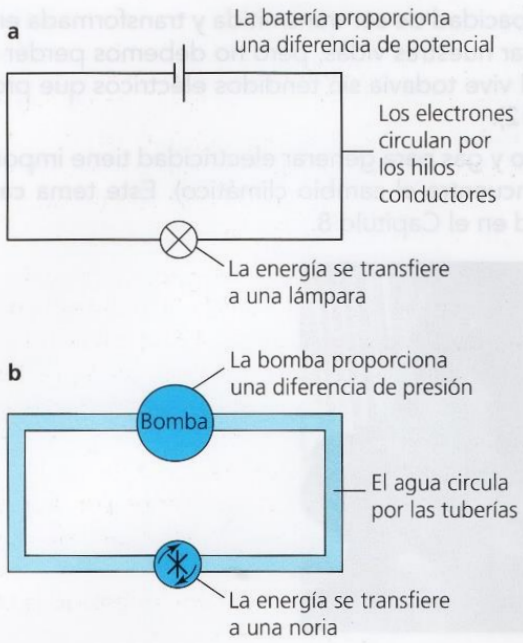


Figura 5.14 *Comparación entre un circuito eléctrico,* **a**, *y un circuito cerrado de agua,* **b**.

la pila de una linterna transforma la energía química en energía eléctrica, y esta a su vez se transforma en energía luminosa y en energía interna en la lámpara de la linterna. Recordemos que los electrones están presentes por todo el circuito y en todo momento, no se originan en la batería.

Puede ser instructivo comparar la batería de un circuito eléctrico con una bomba que impulsa el agua por las tuberías de un circuito de agua, como el que se muestra en la Figura 5.14. La bomba proporciona una diferencia de *presión* que impulsa el agua y, esta a continuación, puede realizar un trabajo útil a medida que se mueve por el circuito (por ejemplo haciendo girar una noria). En un circuito eléctrico se considera que la batería proporciona una diferencia de *potencial* (también llamada *voltaje*). Esta idea la desarrollaremos más adelante en este mismo capítulo.

Naturaleza de la ciencia

Establecimiento de modelos de lo que no podemos ver

Podemos ver un flujo de agua, pero no así un flujo de electricidad, lo que hace de esta materia un objeto de estudio difícil. Además, la comprensión de la electricidad requiere la aceptación de una teoría (un modelo) sobre la estructura fundamental de la materia en forma de partículas y sobre la naturaleza de los átomos.

El intento de explicar las observaciones cotidianas (macroscópicas) mediante el desarrollo de teorías sobre el comportamiento de unas partículas microscópicas que ni siquiera podemos ver es algo habitual entre la comunidad científica. Entender la naturaleza de una corriente eléctrica es solo un ejemplo más entre los muchos ejemplos en los que los estudiantes necesitan aceptar modelos de la realidad que no pueden ver con sus propios ojos. La naturaleza de las ondas electromagnéticas o la teoría cinética de los gases son dos ejemplos más de este tipo de modelos. Los científicos que los han desarrollado son dignos de admiración por su perspicacia e imaginación.

A falta de un modelo mejor, parece sensato aceptar el modelo actual para la conducción en metales, sobre todo porque ha sido comprobado mediante incontables experimentos realizados a lo largo de muchos años y no ha fallado nunca.

Definición de la intensidad de corriente eléctrica

La intensidad de corriente eléctrica (para la que se usa el símbolo *I*) es la tasa del flujo de carga, definida mediante la ecuación:

$$\text{intensidad de corriente eléctrica} = \frac{\text{flujo de carga que pasa por un punto}}{\text{tiempo}}$$

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

La unidad para la intensidad de corriente eléctrica es el **amperio**, A (a veces se abrevia como *amp*). Si por un punto de un circuito pasa un culombio de carga cada segundo, decimos que la intensidad de corriente es de un amperio ($1\ A = 1\ Cs^{-1}$). También se utilizan habitualmente las unidades mA y μA. Cuando decimos que por un conductor metálico pasa una intensidad de corriente de 1 A significa que pasan $6{,}25 \times 10^{18}$ electrones cada segundo.

El amperio es una de las unidades fundamentales del SI y se define como la fuerza eléctrica entre los conductores que transportan la carga por unidad de longitud. El culombio es una unidad derivada que se define en relación al amperio: un culombio es la carga que circula por segundo cuando la intensidad de la corriente es de un amperio.

Corriente continua (CC)

Una **corriente continua** (**CC**) es una corriente que siempre circula en el mismo sentido por un circuito. Las pilas, por ejemplo, suministran CC. Si una corriente va cambiando de sentido repetidamente se denomina **corriente alterna** (**CA**). La CC normalmente es más útil que la CA, pero la corriente eléctrica se transfiere entre los diversos países y hacia nuestras casas mayoritariamente en forma de corriente alterna de alto voltaje (también llamada alta tensión), porque así se pierde menos energía en forma de energía térmica (véase Capítulo 11).

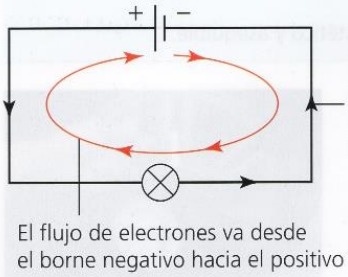


Figura 5.15
El flujo de la intensidad de corriente eléctrica va desde el borne positivo hacia el borne negativo de la batería (por convenio)

Cuando se representa un circuito se suelen dibujar unas flechas que indican el sentido del flujo de la intensidad de corriente continua, pero esto no se puede hacer en el caso de la corriente alterna. El flujo de la intensidad de corriente continua se representa por convenio *siempre* desde el borne positivo de la batería (ya sea una pila o cualquier otra fuente de energía) hacia el borne negativo. Es el sentido en el que se desplazarían las cargas positivas móviles (si se pudieran mover). Como las corrientes eléctricas en sólidos son flujos de electrones cargados negativamente, las flechas tienen *sentido contrario al del movimiento de los electrones* (como se muestra en la Figura 5.15). El significado de los signos positivos y negativos se estudiará más adelante en este mismo capítulo (véase Apartado 5.3).

Enlace con la teoría del conocimiento

Los nombres, las etiquetas y los convenios no se deben confundir con el conocimiento

Los primeros científicos identificaron las cargas positivas como las portadoras de carga en los metales. Posteriormente, el descubrimiento del electrón condujo a la introducción del sentido «convencional» de la intensidad de corriente eléctrica. ¿Fue una solución adecuada para un cambio tan fundamental de escenario? ¿Qué papel representan los cambios de paradigma en la progresión del conocimiento científico?

Los átomos están constituidos por un núcleo central que contiene protones cargados positivamente más electrones cargados negativamente en el exterior. Así es como entendemos un átomo (y como lo explicamos a los alumnos). Pero, ¿es un hecho científico? Si los científicos afirmaran que los electrones están cargados positivamente y los electrones negativamente, no se produciría ninguna diferencia en nuestra comprensión del universo. (De hecho, los protones negativos y los electrones positivos pueden existir y se denominan antimateria).

El uso de los términos positivo y negativo es solo una manera de describir el modo en que interactúan (como decir que lo positivo atrae a lo negativo); intercambiar las etiquetas no cambia el significado. Sin embargo, si no utilizáramos términos como estos no podríamos trasladar fácilmente nuestro conocimiento de la física fundamental a las demás personas.

El sentido «convencional» de la intensidad de corriente eléctrica (desde el borne positivo al negativo) se escogió por común acuerdo hace más de 200 años, mucho antes de que se conociera la naturaleza de la corriente eléctrica. Cuando se descubrió que la corriente en un conductor metálico es en realidad el flujo de electrones cargados negativamente (desde el borne negativo al positivo), no hubo necesidad de cambiar el sentido convencional que, en la mayoría de circunstancias, ha estado en uso durante mucho tiempo. En consecuencia, el convenio se sigue aplicando en la actualidad, a pesar de que no es estrictamente «cierto». (Recordemos, no obstante, que algunas corrientes eléctricas sí se deben al flujo de iones positivos).

Medida de la intensidad de corriente eléctrica con un amperímetro

Un **amperímetro** es el aparato que se utiliza para medir la intensidad de corriente eléctrica. Si queremos medir la intensidad del cable de conexión del circuito representado en la Figura 5.15, debemos conectar un amperímetro tal como se muestra en la Figura 5.16. Como la batería genera una corriente continua, el amperímetro debe colocarse en el sentido correcto, tal como indican las etiquetas o los colores que hay en sus bornes. Un borne rojo (+) indica que ese lado del amperímetro debe conectarse con el lado positivo de la batería. En un laboratorio convencional se dispone de un surtido de amperímetros con diferentes rangos y sensibilidades, y es importante escoger el más adecuado para cada circuito en particular. La intensidad de una corriente alterna no se puede medir con un amperímetro de CC.

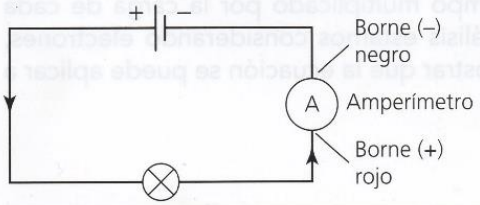


Figura 5.16
Medida de la intensidad de corriente eléctrica con un amperímetro

El amperímetro que conectamos a un circuito no debe afectar a la intensidad de corriente que estamos intentando medir, por tanto debemos asegurarnos de que es un buen conductor.

14 **a** ¿Cuánta carga circula a través de una bombilla durante un segundo si la intensidad de corriente es 0,25 A?
b ¿Cuántos electrones habrán circulado a través de la bombilla durante este tiempo?

15 **a** ¿Cuánta carga ha circulado por una batería durante una hora si la intensidad de corriente es 120 mA?
b ¿Cuánto tiempo tarda en circular por la batería una carga total de 100 C?

16 Investiga cómo es posible que una corriente eléctrica circule por una lámpara fluorescente.

17 Mucha gente piensa que los postes eléctricos son antiestéticos. En la Figura 5.11 se muestra un diseño de poste eléctrico interesante, aunque indudablemente caro.
a Sugiere por qué se trata de un diseño caro.
b Diseña esquemáticamente un poste que tú consideres que puede ser viable, estético y asequible.

Naturaleza de la ciencia

El efecto del observador

Cuando se realizan medidas científicas siempre cabe la posibilidad de que el acto de medir altere lo que se está midiendo. En este apartado tratamos del efecto del uso de medidores eléctricos, pero existen otros muchos ejemplos, como el de los termómetros o los manómetros. Cuando medimos la presión de un neumático de coche, como en la Figura 5.17, parte del aire del neumático fluye hacia el interior del manómetro. El resultado es una reducción de la presión, aunque lo cierto es que probablemente se trata de un valor muy pequeño. Los médicos son conscientes de que la medida de la tensión arterial de un paciente puede estar ligeramente por encima del valor real a causa de los efectos psicológicos de encontrarse en la consulta del médico.

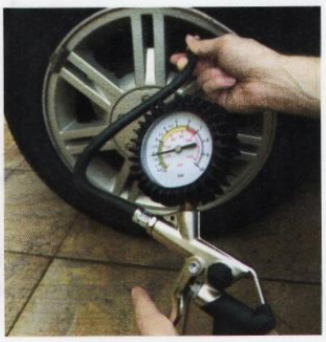


Figura 5.17
Medida de la presión del aire de un neumático

18 Explica cómo puede afectar el uso de un termómetro a la temperatura que se está midiendo.

19 Sugiere otro ejemplo del «efecto del observador» (distinto a los que se han mencionado).

¿Con qué rapidez circula la electricidad?

Esta interesante pregunta tiene más de una respuesta. En nuestro mundo moderno todos nos hemos vuelto dependientes del hecho de que los circuitos eléctricos pueden proporcionar potencia y comunicaciones «instantáneas». Merece la pena que consideremos cómo es esto posible.

La corriente eléctrica que circula a través de un hilo conductor es un flujo de electrones, por tanto, una forma de responder a la pregunta anterior es teniendo en cuenta la velocidad de los electrones. Incluso en un metal por el que no circula corriente eléctrica los electrones libres se mueven de forma aleatoria como las moléculas de un gas, aunque más rápido. Una velocidad aleatoria típica puede ser del orden de 10^6 m s^{-1}. Cuando circula una corriente, los electrones también se desplazan por el hilo conductor. La velocidad neta de los electrones a través de este se denomina **velocidad de deriva**.

Para relacionar la velocidad de deriva a través del hilo conductor con la magnitud de la intensidad de corriente, necesitamos tener en cuenta el número de electrones libres disponibles y el diámetro del hilo conductor. En la Figura 5.18 se representa una corriente de intensidad I circulando a través de un fragmento de hilo conductor de sección transversal A.

Un electrón que viaja por un hilo conductor a una velocidad de deriva v durante un intervalo de tiempo Δt se desplaza una distancia $v\Delta t$. El número de electrones que circulan por el punto P en el intervalo Δt es igual al volumen $v\Delta tA$ (representado mediante la sección sombreada de la Figura 5.18) multiplicado por el número de electrones libres por unidad de volumen, n. (Cada material posee un valor específico de n, que se suele denominar **densidad de carga**).

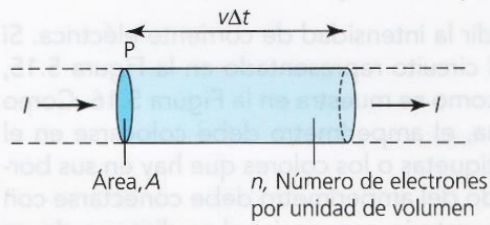


Figura 5.18
Obtención de la ecuación $I = nAvq$

Como la intensidad de corriente es = carga/tiempo, la intensidad de corriente del hilo conductor equivale al número de electrones que circulan por un punto por unidad de tiempo multiplicado por la carga de cada electrón, q. (Aunque en este análisis estamos considerando electrones, estamos usando q y no e para mostrar que la ecuación se puede aplicar a otros tipos de carga).

$$I = \frac{v\Delta tA \times n \times q}{\Delta t}$$

$$I = nAvq$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

20 Calcula la velocidad neta (en mm s^{-1}) de los electrones libres que circulan por un hilo conductor de sección transversal 1,0 mm^2, si la intensidad de corriente es 1,0 A y el metal tiene 1,0 x 10^{28} electrones libres por metro cúbico.

21 Considera un circuito que contiene hilos conductores de distintos grosores y materiales.

a ¿Qué le sucede a la velocidad de los electrones libres si cambiamos el hilo conductor por el que circulan por otro más fino aunque del mismo material? (Supongamos que la intensidad de corriente es la misma). Razona la respuesta.

b En la electrónica moderna se utilizan mucho los semiconductores. Supongamos que un determinado semiconductor tiene un millón de veces menos cargas por m^3 que el metal del apartado **a**. Compara las velocidades probables de las cargas que circulan por estos materiales para una misma intensidad de corriente. ¿Qué supuestos has tenido en cuenta?

22 **a** La densidad del cobre es 8960 kg m^{-3} y su masa molar es 63,5 g. Si cada átomo de cobre proporciona un único electrón libre, determina el número de electrones libres en un metro cúbico de cobre.

b Consulta en Internet qué metales conocidos tienen más electrones libres por metro cúbico que el cobre.

Los cálculos como los que se efectúan para responder a la pregunta 20 indican que la velocidad de deriva de los electrones portadores de corriente en los hilos conductores metálicos suele ser inferior a un milímetro por segundo. Este valor representa una diminuta fracción de su velocidad aleatoria. Esta velocidad tan baja nos puede resultar sorprendente porque estamos acostumbrados a que los aparatos eléctricos funcionen inmediatamente cuando los conectamos. Sin embargo, recordemos que no deberíamos pensar que la corriente se inicia en la batería o en el interruptor, sino que es más adecuado pensar en la totalidad de los electrones libres comenzando a moverse y deteniéndose a la vez, con independencia del lugar del circuito donde se encuentren. Y tampoco es exactamente así: en realidad, cuando conectamos el interruptor, la batería o la fuente de alimentación genera un campo eléctrico que se desplaza por todo el circuito a una velocidad cercana a la de la luz (3 x 10^8 m s^{-1}). Cuando el campo eléctrico llega a cada uno de los electrones individuales, estos experimentan el efecto de una fuerza que inicia su movimiento.

Transferencia de energía en los campos eléctricos

El movimiento de una carga en un campo eléctrico normalmente está asociado a una transferencia de energía. Se realiza un trabajo porque la fuerza se desplaza a lo largo de una distancia (a menos que el movimiento sea perpendicular al campo eléctrico y a la fuerza). A modo de ejemplo general podemos considerar la Figura 5.19, en la que se representa una carga (de prueba) pequeña, $+q$, sometida al campo eléctrico creado por una carga mayor, $+Q$. En este ejemplo ambas cargas son positivas, de forma que hay una fuerza repulsiva, F_R, entre ambas.

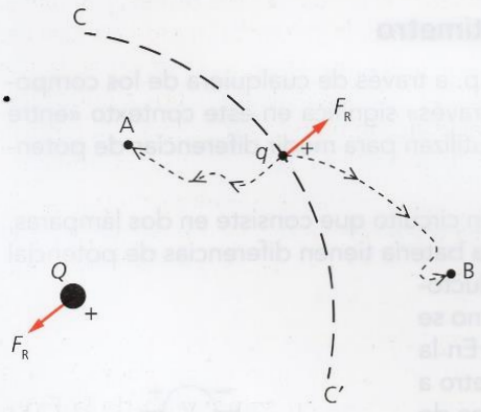


Figura 5.19

Para desplazar la carga q en cualquier dirección que no sea a lo largo de la circunferencia CC' se tiene que realizar un trabajo porque hay una componente de la fuerza repulsiva actuando sobre q. Se necesita una fuerza externa para acercar la carga q a la carga Q, por ejemplo para llevarla hasta la posición A, pero cuando q se aleja de Q, por ejemplo hasta B, es el propio campo el que ejerce el trabajo sobre q.

El trabajo realizado (energía transferida) cuando se desplaza una *unidad de carga* entre dos puntos es una magnitud muy importante en Física. Se denomina **diferencia de potencial** (eléctrico), abreviado normalmente como **d.p.**, y para la que se utiliza el símbolo V. La d.p. entre dos puntos no depende de la trayectoria recorrida. (No es necesario que los estudiantes de Nivel Medio entiendan el concepto de *potencial*, que se trata en el Capítulo 10 para los estudiantes de Nivel Superior).

Diferencia de potencial

La diferencia de potencial, V, entre dos puntos se define como el trabajo, W, que habría que realizar sobre una unidad de carga positiva (+1 C) para desplazarla entre esos dos puntos.

$$\text{diferencia de potencial} = \frac{\text{trabajo realizado}}{\text{carga}}$$

$$V = \frac{W}{q}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

(Si una carga positiva es atraída por una d.p. negativa, el trabajo lo realiza el *campo eléctrico* porque la carga se acelera, de modo que W es negativo. Análogamente, el trabajo realizado también será negativo si una carga negativa es atraída por una d.p. positiva, y acelerada hacia ella).

La unidad de la diferencia de potencial es el **voltio**, V. (En este caso, poco frecuente en Física, la magnitud diferencia de potencial y su unidad tienen el mismo símbolo, aunque las magnitudes se escriben con cursiva). A la diferencia de potencial se le suele denominar **voltaje** o **tensión**. Una d.p. de 1 voltio entre dos puntos significa que se transfiere 1 julio de energía cuando se desplaza 1 culombio de carga entre ambos puntos.

$$1\,\text{V} = 1\,\frac{\text{J}}{\text{C}}$$

El concepto de diferencia de potencial es muy útil siempre que hay desplazamiento de cargas, ya sea entre puntos del espacio o entre puntos situados en los hilos conductores de un circuito eléctrico. Tal vez su uso más habitual es en la descripción de baterías y fuentes de alimentación.

Las baterías y otras fuentes de alimentación proporcionan diferencias de potencial (voltajes) a los circuitos a los que están conectadas porque transfieren energía a la carga que circula a través de ellos. El borne positivo de una batería atrae electrones y el negativo los repele, de forma que circula una corriente por el circuito.

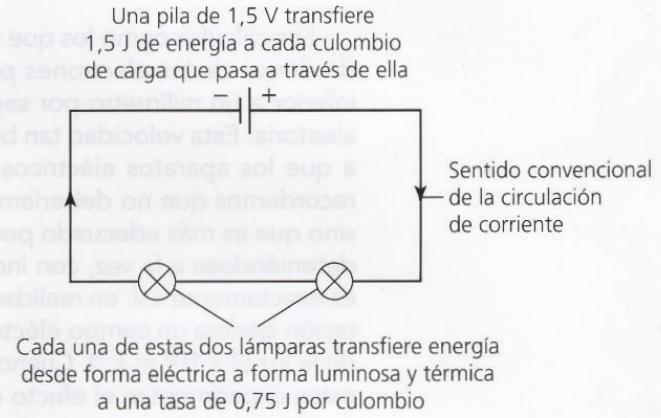


Figura 5.20
Transferencia de energía en un circuito simple

La pila (batería) de 1,5 V de la Figura 5.20 transfiere 1,5 J de energía a cada culombio de carga que circula a través de ella. Si la pila se conecta a dos lámparas idénticas, cada una adquirirá una d.p. de 0,75 V, y habrá una transferencia de energía de forma eléctrica a forma luminosa y térmica a una tasa de 0,75 J desde cada culombio que circula por cada una de las lámparas.

Medida de la diferencia de potencial con un voltímetro

Como la d.p. = energía transferida/carga, existe una d.p. a través de cualquiera de los componentes de un circuito que está transfiriendo energía. («A través» significa en este contexto «entre ambos bornes»). Los **voltímetros** son los aparatos que se utilizan para medir diferencias de potencial (voltajes o tensiones) en los circuitos.

Consideremos la Figura 5.20, en la que se representa un circuito que consiste en dos lámparas, una batería (pila) y tres hilos conductores. Las lámparas y la batería tienen diferencias de potencial entre sus bornes, pero las tres deben ser muy buenas conductoras para que no haya transferencia de energía hacia ellas y no se produzca una diferencia de potencial entre sus extremos. En la Figura 5.21 se muestra cómo se puede conectar un voltímetro a los distintos componentes con objeto de medir diferencias de potencial.

Como la batería produce una corriente continua, los voltímetros se deben conectar en el sentido adecuado, que viene indicado mediante unas etiquetas o colores en los bornes. Un laboratorio convencional dispone de un surtido de voltímetros con distintos rangos y sensibilidades, y es importante escoger el voltímetro adecuado para cada circuito en particular. Las diferencias de potencial (voltajes o tensiones) de corriente alterna no se pueden medir con voltímetros de corriente continua.

Es importante comprender que cuando conectamos un voltímetro a un circuito no debe afectar a la d.p. que se está intentando medir. Esto significa que es necesario que el voltímetro sea muy mal conductor de la electricidad, para que circule muy poca corriente a través de él.

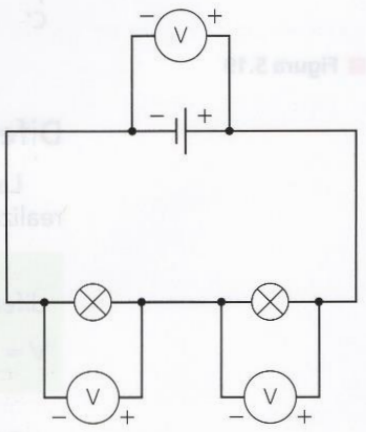


Figura 5.21
Medida de las diferencias de potencial

Ejemplos resueltos

4 **a** ¿Cuánto trabajo hay que realizar para desplazar una carga de +2,4 nC a través de una diferencia de potencial de +9,6 V?
b ¿Quién ejerce el trabajo sobre la carga, una fuerza externa o el campo eléctrico?

a $W = Vq = 9{,}6 \times (2{,}4 \times 10^{-9}) = 2{,}3 \times 10^{-8}$ J

b La carga positiva experimenta una fuerza repulsiva debida a la acción del campo eléctrico, de manera que el trabajo sobre la carga lo debe realizar una fuerza externa.

5 La lámpara de una linterna adquiere una d.p. de 2,9 V cuando circula a través de ella una corriente de 0,53 A.
a ¿Cuánta energía transfiere cada culombio de carga que circula por la lámpara?
b Describe la energía transferida en la lámpara.
c ¿Cuántos electrones circulan por la lámpara cada segundo?
d ¿Cuánta energía transfiere cada electrón?

a 2,9 J

b La energía eléctrica se transfiere en forma de luz y energía térmica.

c $\dfrac{0{,}53}{(1{,}6 \times 10^{-19})} = 3{,}3 \times 10^{18}$

d $W = Vq = 2{,}9 \times (1{,}6 \times 10^{-19}) = 4{,}6 \times 10^{-19}$ J

23 **a** ¿Cuál es la d.p. entre dos puntos si se necesitan $+5{,}7 \times 10^{-6}$ J de trabajo (realizado por una fuerza externa) para desplazar una carga de $+1{,}3 \times 10^{-7}$ C entre ambos puntos?
b ¿En qué cambiaría la respuesta si la carga fuera $-1{,}3 \times 10^{-7}$ C?

24 **a** ¿Cuánta energía se transfiere cuando circulan 4,7 C de carga por una fuente de alimentación conectada a 110 V?
b ¿Cuánta carga debe circular a través de la fuente de alimentación para transferir 1,0 MJ de energía?
c ¿Cuántos electrones se necesitan para transferir 1,0 MJ de energía?

25 **a** ¿Cuál es la d.p. de un calentador de agua si se transfieren 44 000 J de energía en forma de energía interna cuando circulan 200 C de carga a través de él?
b ¿Cuánta carga ha circulado a través de una pila de 1,5 V si se han transferido 60 J de energía?

26 Sugiere qué le ocurriría al circuito de la Figura 5.16 si se reemplazara el amperímetro por un voltímetro.

El electronvoltio como unidad de energía en física atómica

Cuando un electrón se desplaza a través de una d.p. de 1,0 V, el trabajo realizado = carga x d.p.:

$$W = (1{,}6 \times 10^{-19}) \times 1{,}0 = 1{,}6 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

Los físicos acostumbran a evitar este tipo de cálculos (y los números tan pequeños involucrados) diciendo simplemente que se ha transferido una energía de un **electronvoltio**, eV, hacia el electrón, o desde este, cuando se desplaza a través de una d.p. de 1 V.

El electronvoltio, eV, se define como el trabajo realizado cuando se desplaza una carga de $1{,}6 \times 10^{-19}$ C a través de una d.p. de 1 V.

Claramente, $1\ \text{eV} = 1{,}6 \times 10^{-19}$ J

$$W(\text{J}) = W(\text{eV}) \times (1{,}6 \times 10^{-19})$$

Esta ecuación no figura en el *Apéndice de datos de Física*.

De hecho, el electronvoltio es una unidad de energía de uso común cuando se trata de la energía de una partícula atómica *cualquiera*. Las unidades keV y MeV también son de uso frecuente. El trabajo realizado cuando se desplaza *cualquier* partícula cargada (con una carga de $1{,}6 \times 10^{-19}$ C) a través de una d.p. de 1 V es 1 eV. El trabajo realizado cuando se desplaza un ión con una carga doble a través de una d.p. de 1 V es 2 eV y así sucesivamente.

El electronvoltio también se utiliza de forma generalizada como unidad para la energía cinética de las partículas atómicas (con independencia de si se desplazan o no a través de una d.p.), y como unidad para la energía transferida por los fotones de energía electromagnética.

Ejemplos resueltos

6 ¿Cuánta energía gana un protón que es acelerado hacia una placa de metal cargada negativamente por una d.p. de 3500 V? Da tu respuesta en:
a electronvoltios
b julios.

a 3500 eV
b $3500 \times (1{,}6 \times 10^{-19}) = 5{,}6 \times 10^{-16}$ J

7 ¿Cuántos keV de energía se transfieren hacia (o desde) un ion de carga $3{,}2 \times 10^{-19}$ C cuando se desplaza a través de una d.p. de 4000 V?

$$\left(\frac{3{,}2 \times 10^{-19}}{1{,}6 \times 10^{-19}}\right) \times 4{,}0 = 8{,}0 \text{ keV}$$

8 Un electrón de masa $9{,}1 \times 10^{-31}$ kg es acelerado a través de una d.p. de 3000 V.
a Calcula su velocidad final.
b ¿Qué supuestos has tenido en cuenta?

a La energía transferida al electrón = energía cinética

$$Ve = \frac{1}{2}mv^2$$

$$3000 \times (1{,}6 \times 10^{-19}) = \frac{1}{2} \times (9{,}1 \times 10^{-31}) \times v^2$$

$$v = 3{,}2 \times 10^{7} \text{ m s}^{-1}$$

b En este cálculo se ha tenido en cuenta que el electrón comienza con una energía cinética despreciable y que no hay transferencia de energía hacia el exterior durante la aceleración (porque está en el vacío).

27 Un electrón se mueve directamente hacia una placa cargada negativamente con una velocidad de $1{,}30 \times 10^{7}$ m s^{-1}.
a ¿Cuál es la energía cinética del electrón en:
i julios
ii electronvoltios?
b Si la tensión sobre la placa es –500 V, ¿alcanzará el electrón la placa? Razona la respuesta.

28 **a** Una partícula emitida durante una desintegración radiactiva tiene una energía de 2,2 MeV. ¿Cuál es su energía (en julios)?
b Si su masa es $6{,}8 \times 10^{-27}$ kg, ¿cuál es su velocidad?

29 Calcula cuánta energía cinética (en julios) gana un protón que es acelerado en el vacío a través de una d.p. de 5000 V.

30 Un fotón de luz transfiere aproximadamente 2,0 eV de energía.
a Convierte esta energía a julios.
b ¿Cuántos fotones se emiten cada segundo desde una bombilla que emite 4 W de energía luminosa?

Naturaleza de la ciencia

Los efectos útiles de la electricidad

Hace ya casi 200 años que los científicos saben que cuando una corriente eléctrica circula a través de una sustancia puede tener (solo) tres efectos básicos:

- un *efecto calorífico*, porque las cargas en movimiento «colisionan» con los átomos e iones de la sustancia
- un *efecto químico* en algunos líquidos y gases, porque las cargas que se mueven en sentidos contrarios ocasionan una descomposición química
- un *efecto magnético* alrededor de la corriente.

Cualquier lista de aparatos eléctricos y electrónicos que utilizamos en el mundo moderno y que tan útiles nos resultan, es sorprendentemente larga y variada en comparación con esta breve lista de efectos. La mayoría de nosotros nos hemos vuelto muy dependientes del uso de estos aparatos y si nos vemos privados de electricidad en nuestros hogares o en nuestros dispositivos móviles, nos angustiamos y nos sentimos infelices muy rápidamente.

El avance científico y tecnológico en el uso de la electricidad ha tenido lugar a una velocidad enorme. En el transcurso de apenas 250 años hemos pasado del descubrimiento de las corrientes eléctricas hasta, por ejemplo, los teléfonos inteligentes, los escáneres cerebrales, los coches eléctricos, las máquinas de café expreso y los dispositivos de aire acondicionado. Para la mayor parte de las personas y de las sociedades, el mundo moderno es increíblemente distinto del mundo de hace 200 años, y la mayoría afirmaría que los cambios (proporcionados por las corrientes eléctricas) han sido en general para mejor.

31 Averigua qué científicos son famosos por sus estudios pioneros de las corrientes eléctricas, y dónde y cuándo los llevaron a cabo.

32 Escribe los nombres de cinco aparatos eléctricos que tengas en casa y que utilicen:
- a el efecto calorífico de la corriente
- b el efecto magnético de la corriente. (El efecto magnético de la electricidad se usa para producir movimiento.)
- c ¿Tienes aparatos eléctricos en casa que comporten reacciones químicas?

33 En algunos programas de «telerrealidad» aparecen personas que intentan vivir sin algunas de las «comodidades» modernas. Los Amish de Pennsilvania (EE. UU.) son conocidos por su modo de vida, que rechaza la tecnología moderna (véase Figura 5.22). ¿Por qué puede resultar atractiva una vida sin electricidad?



Figura 5.22
Una calesa Amish

5.2 Efecto calorífico de una corriente eléctrica

Uno de los primeros usos de la electricidad fue la producción de luz y calor; esta tecnología continúa teniendo un enorme impacto en las vidas de las personas de todo el mundo

El efecto calorífico de una corriente eléctrica se utiliza de forma generalizada en todo el mundo para calentar agua, para lavar y cocinar, y para calentar aire (de forma directa o indirecta) para mantener calientes los hogares y los entornos de trabajo. Este efecto calorífico también lo utilizan las planchas y las tostadoras, además de las lámparas incandescentes, que necesitan calentarse mucho antes de que puedan emitir luz.

Enlace con la teoría del conocimiento

Explorar lo desconocido puede comportar riesgos

En las primeras investigaciones sobre la electricidad, la ***percepción sensorial*** *fue clave a la hora de clasificar los efectos de diversas fuentes de alimentación, aunque las consecuencias para los científicos implicados podían ser irreversibles. ¿Tiene sentido seguir utilizando la percepción sensorial en la investigación científica desde el punto de vista ético y de la seguridad?*

Actualmente conocemos los riesgos que comporta el paso de la corriente eléctrica a través del cuerpo humano, pero en los primeros estudios estos riesgos no se conocían suficientemente o no estaban totalmente bajo control, lo que se tradujo en varias muertes accidentales. En la Figura 5.23 se ilustra un conocido y peligroso experimento llevado a cabo por Benjamin Franklin.



Figura 5.23
Famoso experimento de Benjamin Franklin en el que hizo volar una cometa en plena tormenta eléctrica como parte de sus investigaciones sobre la electricidad

Diagramas de circuito

Los **diagramas de circuito** se utilizan de forma generalizada para representar cómo están conectados los componentes eléctricos entre sí para realizar tareas útiles. Los cables de conexión (hilos conductores) se deben dibujar rectos y paralelos a los márgenes del papel.

Cualquier circuito necesita al menos una fuente de energía. Una **pila** es un componente que transfiere energía química en forma de energía eléctrica. Cuando conectamos una serie de pilas decimos que tenemos una **batería**, aunque en el lenguaje cotidiano ambos términos, pila y batería, se confunden. La línea más larga representa el borne positivo de la pila.

Naturaleza de la ciencia

El uso de símbolos comunes

La comunicación de la información y las ideas científicas entre los distintos países y culturas puede verse afectada negativamente por las dificultades con el lenguaje, aunque puede resultar de gran ayuda el uso de símbolos estándar para las magnitudes (y las unidades) físicas y para los componentes eléctricos. El idioma inglés se está convirtiendo cada vez más en el idioma internacional de la ciencia pero, naturalmente, muchas personas, organizaciones y países prefieren utilizar su propio idioma. Imaginemos por un momento la confusión que se produciría si los distintos países utilizaran símbolos y lenguajes totalmente diferentes para representar la circuitería de un moderno avión internacional, por ejemplo.

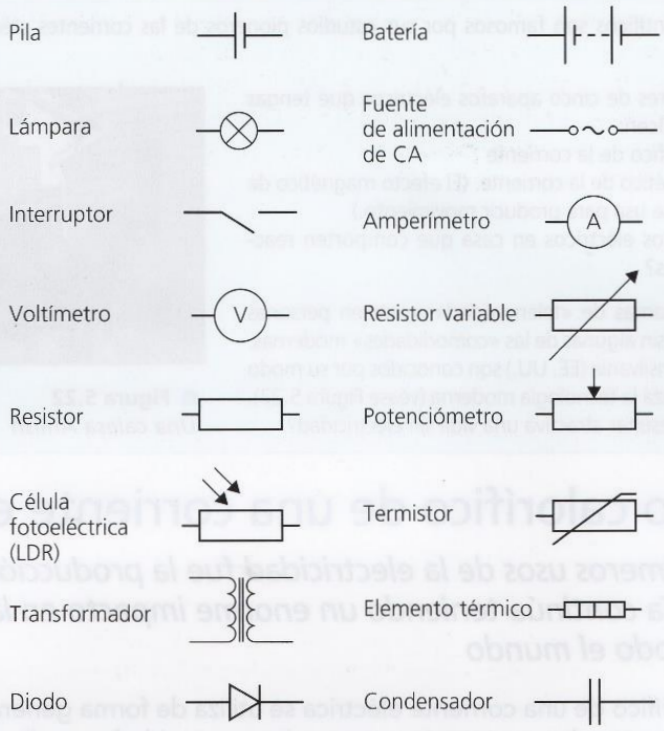


Figura 5.24
Resumen de los símbolos utilizados en los circuitos que se estudian durante este curso

En la Figura 5.24 se muestran los símbolos internacionales utilizados en los circuitos eléctricos que se estudiarán durante este curso. Puedes encontrarlos en el *Apéndice de datos de Física*.

Los componentes se pueden conectar en serie o en paralelo. Conectar **en serie** significa que los componentes se conectan uno a continuación del otro sin trayectorias alternativas para la corriente. Por todos los componentes de un circuito en serie circula la misma intensidad de corriente. Cuando los componentes están conectados **en paralelo** la intensidad de corriente se divide porque para ir de un punto a otro del circuito puede escoger entre dos o más trayectorias. En un diagrama de circuito en paralelo se deben representar mediante un punto sólido todos los nodos, donde confluyen dos o más hilos conductores y, por tanto, la corriente puede seguir más de una trayectoria.

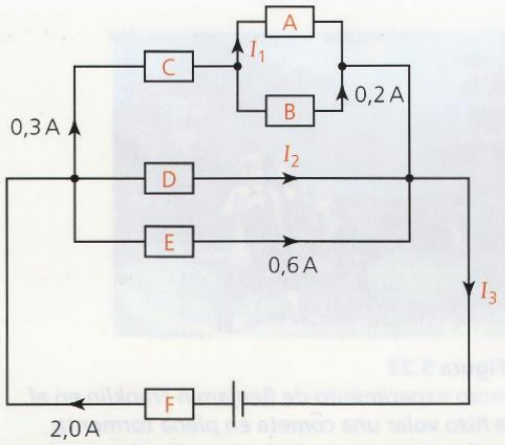


Figura 5.25

Es muy habitual que en un mismo circuito haya componentes en serie y componentes en paralelo. Consideremos la Figura 5.25: A y B están en paralelo entre sí, pero en conjunto están en serie con C. La combinación de A, B y C está en paralelo con D y con E. A su vez, todo este conjunto está en serie con F y la pila.

Leyes de Kirchhoff de un circuito

Estas dos leyes se utilizan para ayudar a predecir las intensidades de corriente y las diferencias de potencial que se producirán en un circuito. Ambas derivan de las leyes de conservación de la carga y de la energía aplicadas a un circuito eléctrico.

Primera ley de Kirchhoff

Como la carga se conserva, la carga que llega a un nodo cualquiera de un circuito debe ser igual a la carga que sale. Esto significa que la intensidad total (carga/tiempo) que llega a un nodo debe ser igual a la intensidad total que lo abandona. Consideremos la Figura 5.26 a modo de ejemplo simple. La intensidad de corriente desconocida, I, debe ser de 3 A hacia la izquierda, hacia P, de modo que la intensidad de corriente que llega a P es 5 + 3 = 8 A, la misma intensidad de corriente que sale de P.

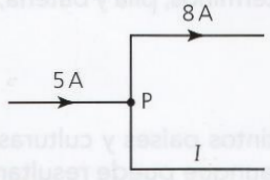


Figura 5.26
Intensidad de corriente que llega a un nodo

La manera más simple de expresar esta ley es la siguiente:

$\Sigma I = 0$ (nodo)

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

La letra griega sigma mayúscula, Σ, se utiliza aquí para representar «la suma de». Por tanto, el significado de la ecuación anterior es que la suma de todas las intensidades de corriente en un nodo es cero. Recordemos que las intensidades de corriente que llegan a un nodo y las que salen tienen signos contrarios. En general, a las corrientes que llegan a un nodo se les otorga signo positivo y a las que salen, negativo, pero también podría ser al revés. Así, podemos reescribir el ejemplo de la Figura 5.26 de la forma siguiente:

$5 + I - 8 = 0$

$I = 8 - 5 = 3\,A$

Como «3» es positivo, indica que la intensidad de corriente I es *hacia* P.

Segunda ley de Kirchhoff

Como la d.p. = energía transferida/carga, cualquier componente de un circuito eléctrico que está transfiriendo energía a medida que circula carga a través de él tiene que tener una d.p. entre sus extremos.

A partir de la ley de conservación de la energía sabemos que la energía suministrada a las cargas que se mueven por un circuito cerrado (o por cualquier bucle en el interior de un circuito cerrado), debe ser igual a la energía transferida en otras formas por los componentes de este circuito cerrado.

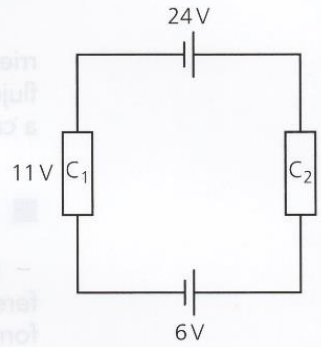


Figura 5.27
Diferencias de potencial en un circuito cerrado

De aquí, la suma de las d.p. que suministran energía a cualquier circuito cerrado debe ser igual a la suma de las d.p. a través de los componentes utilizados para transferir energía en otras formas (en el mismo circuito cerrado). Consideremos la Figura 5.27, en la que hay dos pilas en oposición de manera que la d.p. combinada es (24 – 6) = 18 V. Si la d.p. en el componente 1 es 11 V, entonces la d.p. en el componente 2 debe ser (18 – 11) = 7 V.

La manera más simple de expresar esta ley es:

$\Sigma V = 0$ (circuito cerrado)

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

La aplicación de la segunda ley de Kirchhoff a circuitos más complejos puede provocar confusión. Volveremos a este tema en el Ejemplo resuelto 14.

34 Dibuja un diagrama de circuito en el que representes los elementos siguientes: dos lámparas, A y B, conectadas a una batería de 12 V con un interruptor que únicamente puede controlar la lámpara A (la lámpara B siempre está encendida). Se conecta un amperímetro para medir la intensidad total de corriente en ambas lámparas y un voltímetro para medir la d.p. en la batería.

35 Determina la intensidad de corriente en el punto P de la Figura 5.28.

36 Determina los valores de las intensidades de corriente I_1, I_2 e I_3 de la Figura 5.25.

37 En la Figura 5.29 se representan las d.p. en los componentes de un circuito eléctrico. Determina las magnitudes de V_1 y V_2.

38 El uso de un lenguaje y unos símbolos comunes acordados por convenio para la redacción de documentos científicos tiene ventajas evidentes, pero por lo demás puede ser visto como una seria amenaza para la diversidad, la cultura y la historia de los diversos países.
a Redacta un breve resumen (de unas 100 palabras) con tu opinión sobre este tema.
b Si quisiéramos utilizar un lenguaje común, ¿cuál podría ser? ¿Por qué?

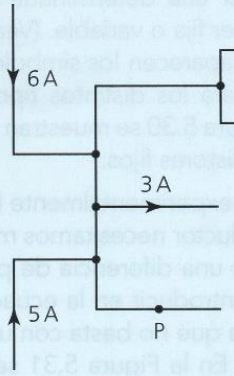


Figura 5.28

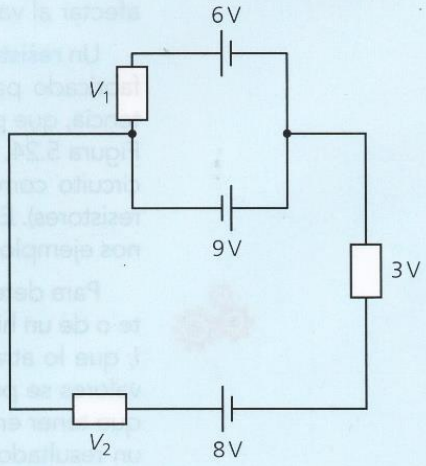


Figura 5.29

El efecto calorífico de la corriente eléctrica y sus consecuencias

Cuando una corriente eléctrica pasa a través de un conductor, los electrones libres transfieren parte de su energía a los iones o átomos con los que «colisionan». Cualquier incremento de la amplitud de las vibraciones de los iones o de los átomos se traduce en un incremento de la energía interna y de la temperatura del conductor.

Este efecto resulta muy útil en el caso de los calentadores eléctricos, pero para la mayoría de aparatos, cables de conexión y demás conexiones (incluyendo clavijas y enchufes), cualquier efecto de calentamiento es altamente indeseable, ya que comporta una pérdida de energía útil, además de un peligro potencial de fuego. Los cables de conexión deben estar fabricados con hilo metálico que sea buen conductor de la electricidad (normalmente cobre), y lo bastante grueso como para que no haya un efecto calorífico significativo cuando se usa normalmente. (En el cableado doméstico se emplean fusibles o *disyuntores* que desconectan la corriente si la intensidad aumenta de forma peligrosa).

El efecto calorífico de una corriente eléctrica depende de la magnitud de la intensidad de corriente (evidentemente) y del grado de oposición/resistencia que presenta el material conductor al flujo de corriente, denominado **resistencia** del conductor. En el apartado siguiente aprenderemos a calcular la resistencia.

La resistencia expresada como $R = \frac{V}{I}$

Hemos visto que para que una corriente circule por un circuito es necesario que exista una diferencia de potencial procedente de una fuente de energía. La pregunta obvia que nos podemos formular es: «¿Cuál es la relación de dependencia entre la magnitud de la intensidad de corriente y la magnitud de la d.p.?» La respuesta es simple: la intensidad de corriente para una d.p. concreta depende de la resistencia del componente o del hilo conductor.

La resistencia se define como el cociente entre la diferencia de potencial en un conductor y la intensidad de corriente que lo atraviesa. Se le otorga el símbolo *R*.

$$\text{resistencia} = \frac{\text{diferencia de potencial}}{\text{intensidad de corriente}}$$

$$R = \frac{V}{I}$$

La unidad de la resistencia es el **ohmio, Ω**. Si una d.p. de 1 V produce una intensidad de corriente de 1 A, la resistencia es 1. Las unidades kΩ y MΩ son también de uso frecuente.

La resistencia de un componente o de un hilo conductor puede variar en función de las circunstancias. En particular, una variación significativa de la temperatura suele afectar al valor de la resistencia.

Un **resistor** es un componente que ha sido fabricado para tener una determinada resistencia, que puede ser fija o variable. (Véase la Figura 5.24, donde aparecen los símbolos de circuito correctos para los distintos tipos de resistores). En la Figura 5.30 se muestran algunos ejemplos de resistores fijos.

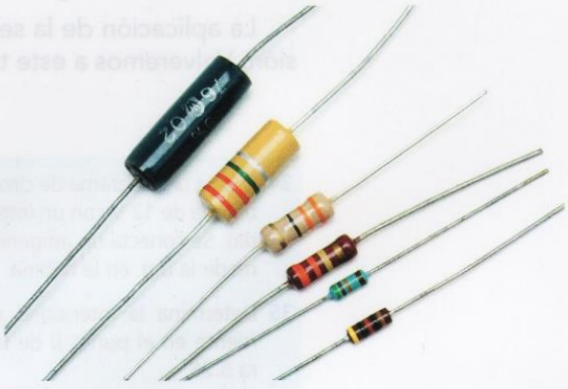


Figura 5.30
Resistores fijos

Para determinar experimentalmente la resistencia de un componente o de un hilo conductor necesitamos medir la intensidad de corriente, *I*, que lo atraviesa a una diferencia de potencial *V* determinada. Estos valores se pueden introducir en la ecuación $R = V/I$. No obstante, hay que tener en cuenta que no basta con un par de lecturas para obtener un resultado fiable. En la Figura 5.31 se representa un circuito simple para determinar el valor de la resistencia. (La mayoría de medidores eléctricos digitales contienen un juego de resistencias mediante el cual se puede determinar el valor de una resistencia cualquiera sin necesidad de realizar más experimentos. De hecho, la propia batería del medidor eléctrico envía una corriente eléctrica a través de la resistencia a determinar y a continuación utiliza los datos para calcular su valor).

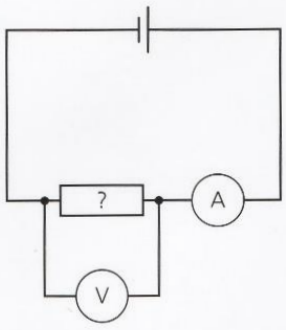


Figura 5.31
Determinación del valor de una resistencia desconocida

Podemos calcular el valor de la resistencia a partir de corriente continua o bien de corriente alterna. El valor obtenido en los cálculos es el mismo en ambos casos.

Ejemplo resuelto

9 **a** Calcula la resistencia de un componente si produce una intensidad de corriente de 0,15 A cuando está sometido a una d.p. de 8,7 V.

b Si la d.p. aumenta hasta 12,4 V, la intensidad de corriente aumenta hasta 0,17 A. ¿Cuál es la nueva resistencia?

a $R = \frac{V}{I}$

$R = \frac{8,7}{0,15}$

$R = 58\,\Omega$

b $R = \frac{V}{I}$

$R = \frac{12,4}{0,17}$

$R = 73\,\Omega$

39 ¿Qué voltaje se necesita para que una intensidad de corriente de 560 mA pase por un resistor de 670 Ω?

40 ¿Qué resistencia tiene un calentador de agua doméstico de 230 V si la intensidad de corriente que circula por él es 8,4 A?

41 ¿Qué intensidad de corriente circula a través de un resistor de 37 kΩ cuando está sometido a una d.p. de 4,5 V?

42 ¿A qué d.p. está sometido un resistor si lo atraviesan 120 C de carga en 60,0 s?

Amperímetros y voltímetros ideales y no ideales

Consideremos de nuevo la Figura 5.31. El amperímetro se ha conectado con la intención de medir la intensidad de corriente a través del resistor únicamente, pero por el modo en que ha sido conectado medirá la intensidad a través del resistor *más* la intensidad a través del voltímetro. Este problema se podría resolver desplazando la conexión del voltímetro al otro lado del amperímetro, pero entonces surgiría un nuevo problema: el voltímetro mediría la d.p. a través del resistor *más* la d.p. a través del amperímetro.

Estos problemas se pueden evitar utilizando medidores «ideales»: un **voltímetro ideal** tiene una resistencia infinita y un **amperímetro ideal** tiene una resistencia cero. Los amperímetros con resistencia muy baja, aconsejables para la mayoría de experimentos, se pueden encontrar de forma habitual en los laboratorios. Los voltímetros digitales suelen tener resistencias superiores a un millón de ohmios y son instrumentos de laboratorio muy versátiles. Los voltímetros de bobina móvil tienen resistencias mucho más bajas y su utilización en circuitos con resistencias altas puede ser inadecuada.

En la Figura 5.32 se muestra el principio de funcionamiento de uno de los primeros tipos de amperímetros (ciertamente no se trata de un amperímetro ideal) que desempeñó un importante papel en el desarrollo de las medidas en circuitos eléctricos. Cuando la corriente pasa por el hilo conductor, este se calienta (debido a su resistencia) y su longitud aumenta ligeramente (se dilata). El peso que cuelga del hilo lo hace combarse y esta curvatura se puede transformar fácilmente en una pequeña deflexión de un puntero, de manera que se pueda llevar a cabo un interesante estudio.

En un laboratorio escolar moderno nos puede interesar medir intensidades de corriente de muy diversa magnitud, normalmente desde nanoamperios (o menos) hasta unos pocos amperios. Las medidas de la diferencia de potencial (voltaje o tensión) también cubren un rango muy amplio. Los polímetros digitales pueden ser muy útiles, pero para medir intensidades de corriente y voltajes muy bajos se necesitan instrumentos muy especializados y sensibles.

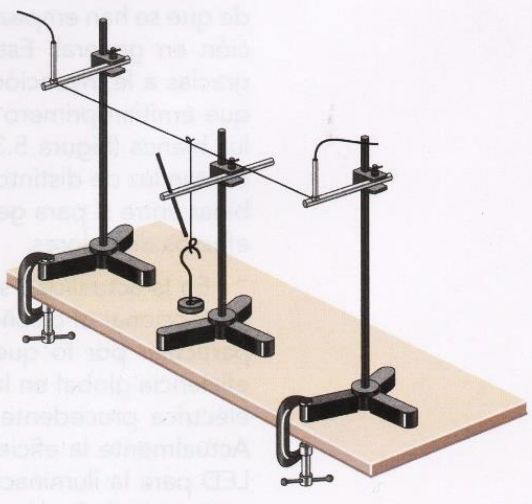


Figura 5.32
Un modelo de amperímetro de hilo caliente

Aplicaciones

Circuitos eléctricos: iluminar nuestros hogares

Los primeros inventos que produjeron luz a partir de la electricidad utilizaron el efecto calorífico de una corriente eléctrica sobre un hilo conductor metálico para calentarlo hasta que emitiera luz visible. Este principio sigue en uso actualmente: el hilo se denomina *filamento* y las lámparas que funcionan gracias a este efecto se denominan *incandescentes*. Las lámparas incandescentes, como las que se muestran en la Figura 5.33a, se pueden diseñar para ser utilizadas con un amplio abanico de voltajes y potencias. Pueden ser lo bastante grandes como para iluminar una habitación o lo bastante pequeñas como para utilizarlas en una linterna de bolsillo.

Las lámparas incandescentes son fáciles y baratas de fabricar, pero transforman en luz visible menos del 10% de la energía eléctrica que se les transfiere (el resto se transforma en energía térmica). Si consideramos el número total de lámparas de filamento que se usan en todo el mundo vemos que se trata, sin duda, de un enorme despilfarro de energía cuya producción tiene, además, importantes efectos medioambientales sobre el planeta.

Cuando una corriente eléctrica atraviesa un gas a baja presión también puede producir luz visible, pero también se puede emitir una importante cantidad de radiación ultravioleta. Si el interior del recipiente de cristal se reviste de manera conveniente, la mayor parte de la radiación ultravioleta se puede transferir en forma de luz visible. El conjunto del tubo de cristal más el revestimiento se denomina **fluorescente**. Las lámparas fluorescentes por regla general son mucho más eficientes en la producción de luz que las lámparas incandescentes, pero tienen la desventaja de ser más grandes y más caras, además de que no se pueden utilizar con bajos voltajes. Los largos tubos fluorescentes (Figura 5.33b), se han considerado durante mucho tiempo como la mejor opción para la iluminación de establecimientos comerciales, oficinas, escuelas y anuncios luminosos. En los últimos años, sin embargo, se han comercializado lámparas fluorescentes más pequeñas y más baratas, muy adecuadas para el uso doméstico. Actualmente el uso generalizado de lámparas incandescentes para la iluminación de los hogares está desaconsejado en la mayoría de países. Es probable que en el futuro cada vez más países limiten el uso de lámparas incandescentes.

Las denominadas *lámparas fluorescentes compactas* (CFL, por sus siglas en inglés), además de ser mucho más eficientes que las lámparas incandescentes normalmente tienen una «vida útil» (duración hasta que necesitan ser reemplazadas) mucho más larga que estas últimas. Este aspecto es muy importante a la hora de tener en cuenta los costes financieros y los efectos medioambientales de su fabricación y distribución comercial.

Los **diodos emisores de luz** (LED, por sus siglas en inglés) representan otra alternativa para la iluminación de nuestros hogares. Se han utilizado durante mucho tiempo para indicar si un aparato eléctrico está encendido o apagado, y son muy útiles para este propósito gracias a su pequeño tamaño, baja potencia, bajo coste, fiabilidad y duración. Los primeros diseños de lámparas LED emitían luz roja o luz verde y han transcurrido apenas unos pocos años desde que se han empezado a utilizar para iluminación en general. Esto último ha sido posible gracias a la invención en 1990 de diodos LED que emitían primero luz azul y posteriormente luz blanca (Figura 5.33d). Los diodos LED que emiten luz de distintos colores se pueden combinar entre sí para generar un amplio rango de efectos de colores.

En la actualidad se sigue investigando para perfeccionar el diseño de las lámparas LED, en particular por lo que respecta a aumentar su eficiencia global en la conversión de la energía eléctrica procedente de la red en luz visible. Actualmente la eficiencia del uso de lámparas LED para la iluminación doméstica es algo superior a la de las lámparas CFL, pero las primeras son mucho más caras. No obstante, las lám-

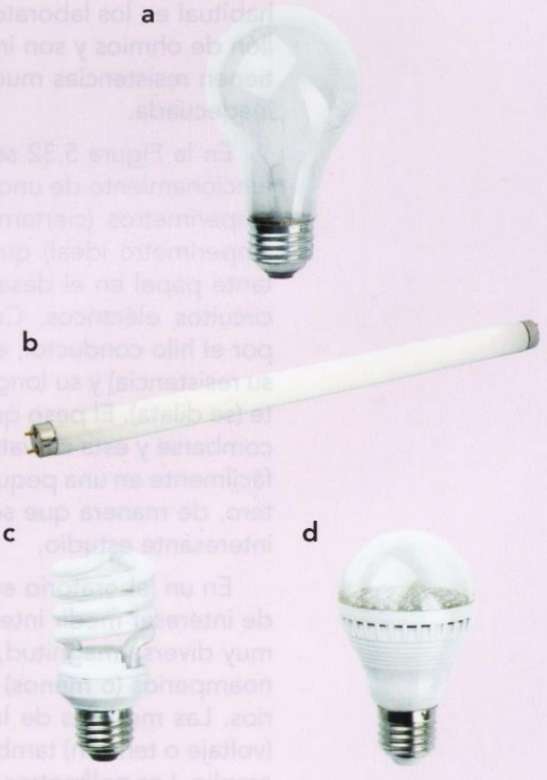


Figura 5.33
Cuatro tipos de lámparas: **a** *incandescente,* **b** *tubo fluorescente,* **c** *CFL,* **d** *LED*

paras LED ofrecen muchas más posibilidades para un diseño de iluminación interesante e innovador, además de ser más fiables y duraderas.

1 Haz una lista de las propiedades que debería tener una lámpara para que constituyera una elección adecuada en la iluminación de los hogares de todo el mundo.

2 Consulta Internet para buscar información sobre los últimos avances en lámparas incandescentes, lámparas CFL y lámparas LED. Utiliza la lista de propiedades que has recogido en la pregunta **1** para comparar las ventajas y desventajas que presentan estos tres tipos de lámparas.

Ley de Ohm

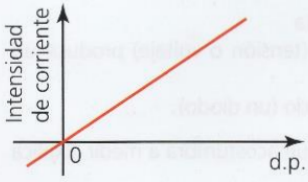


Figura 5.34
Ley de Ohm para un resistor óhmico

Si la temperatura de un conductor metálico se mantiene constante, su resistencia no cambia porque cualquier incremento de la diferencia de potencial que se produzca a lo largo del conductor comporta un incremento proporcional de la intensidad de corriente, de manera que V/I (= R) permanece constante, tal como se muestra en la Figura 5.34. Esta relación fue descubierta por el físico alemán Georg Ohm en 1827. (Observa que la gráfica se ha ampliado de algún modo hacia valores negativos para indicar que el comportamiento sería el mismo si tanto la d.p. como la intensidad de corriente tuvieran sentidos contrarios).

La **ley de Ohm** afirma que la intensidad de corriente que circula a través de un conductor es proporcional a la diferencia de potencial a través de este, siempre que la temperatura sea constante.

$I \propto V$ a temperatura constante

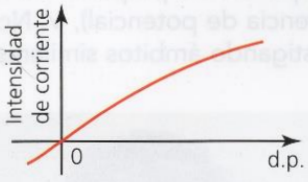


Figura 5.35
Gráfica intensidad de corriente – d.p. para una lámpara incandescente

Si la temperatura de un conductor metálico no varía demasiado, por lo general se puede asumir que la resistencia es constante y se puede aplicar la ley de Ohm. Si por el contrario hay grandes cambios de temperatura, la ley de Ohm no es útil. Por ejemplo, la temperatura de funcionamiento de una lámpara incandescente puede ser de unos 2 500 °C y su resistencia a esa temperatura puede ser significativamente mayor que su resistencia a temperatura ambiente. En la Figura 5.35 se representa el efecto del aumento de la temperatura y la resistencia de una lámpara incandescente sobre su gráfica *I–V*.

La ley de Ohm es un punto de partida para entender la conducción eléctrica, pero existen muchos componentes de un circuito a los que no se les puede aplicar esta ley. Para estudiar la respuesta eléctrica de un componente específico de un circuito (como una lámpara incandescente, por ejemplo) se puede utilizar cualquiera de los circuitos que se representan en la Figura 5.36. En el circuito **a** se utiliza una fuente de alimentación variable para obtener distintos voltajes sobre el componente. En el circuito **b** se utiliza una batería de voltaje fijo y un **resistor variable** (un **reóstato**) para cambiar la resistencia total del circuito y, por tanto, la intensidad de corriente y el voltaje del componente. Sin embargo, como veremos más adelante en este mismo capítulo, la mejor elección para este estudio es el uso de una batería y de un *circuito divisor de potencial*.

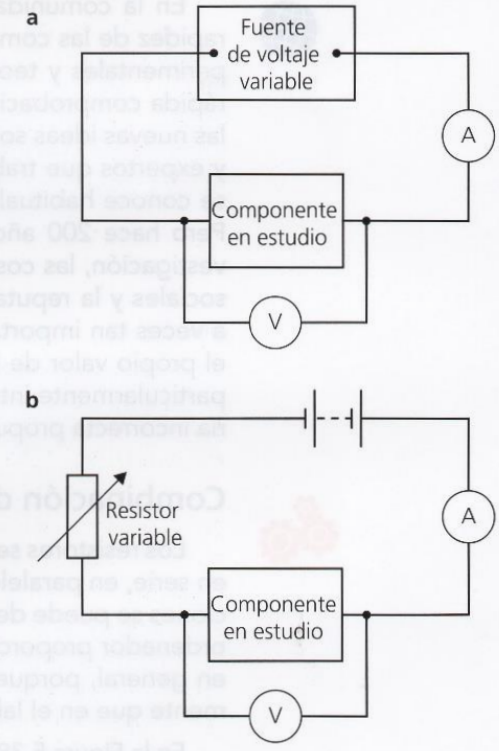


Figura 5.36
Dos métodos para estudiar la relación característica I–V de un componente eléctrico

Si la corriente que circula por un componente eléctrico es proporcional a la d.p. entre sus bornes, se describe como un componente **óhmico**, porque «obedece» la ley de Ohm y la gráfica *I-V* es una línea recta que pasa por el origen (Figura 5.34). Un hilo conductor metálico a temperatura constante es un dispositivo óhmico. El resto de componentes (incluidos los que no se utilizan a una temperatura aproximadamente constante) se describen como **no-óhmicos** (como en la Figura 5.35). Una lámpara incandescente es un dispositivo no–óhmico porque su temperatura cambia de forma significativa cuando la atraviesan distintas intensidades de corriente eléctrica.

Se puede estudiar la dependencia con la temperatura de un hilo de resistencia haciendo una derivación del hilo hacia la cubeta de un termómetro de largo alcance mientras se mide su resistencia.

43 Sugiere algunos motivos por los cuales no se utilizan los amperímetros de hilo caliente en los laboratorios modernos.

44 Dibuja esquemáticamente una gráfica *I-V* característica para:
- **a** un dispositivo cuya resistencia disminuye cuando la intensidad de corriente aumenta
- **b** un dispositivo no-óhmico para el que un aumento de la diferencia de potencial (tensión o voltaje) produce un aumento equivalente de la intensidad de corriente
- **c** un dispositivo que solo permite la circulación de corriente en un determinado sentido (un diodo).

45 Da un ejemplo de aparato de medida no eléctrico que pueda afectar a la magnitud que acostumbra a medir. Explica por qué los resultados de la medida pueden ser inexactos.

Naturaleza de la ciencia

¿Evaluación por parte de colegas o competición entre científicos?

La ley de Ohm fue publicada en Alemania en 1827 en la forma siguiente: la intensidad de corriente en un hilo conductor, *I*, es proporcional a (A/L) *V*, donde *A* es el área de la sección transversal de un hilo metálico uniforme de longitud *L*. Dos años antes, en el Reino Unido, Peter Barlow había propuesto, de forma incorrecta, la «ley de Barlow», que afirmaba que la *I* era proporcional a $\sqrt{(A/L)}$, sin hacer referencia al concepto clave de voltaje (tensión o diferencia de potencial), *V*. No es inusual que dos o más científicos o grupos de científicos estén investigando ámbitos similares de la ciencia simultáneamente, a menudo en distintos países.

En la comunidad científica moderna global, con la facilidad y rapidez de las comunicaciones de masas, los nuevos resultados experimentales y teorías están sujetos a un estricto escrutinio y una rápida comprobación nada más ser publicados. Con este objetivo, las nuevas ideas son revisadas cuidadosamente por otros científicos y expertos que trabajan en este mismo campo, en un proceso que se conoce habitualmente como **evaluación por parte de colegas**. Pero hace 200 años, cuando Ohm estaba llevando a cabo su investigación, las cosas eran muy distintas. En esa época los factores sociales y la reputación, el poder y la influencia del científico eran a veces tan importantes a la hora de juzgar las nuevas ideas como el propio valor de la investigación. La historia de Barlow y Ohm es particularmente interesante porque, en un primer momento, la teoría incorrecta propuesta por Barlow fue mayoritariamente aceptada.



Figura 5.37
Georg Ohm

Combinación de resistores en serie y en paralelo

Los resistores se pueden unir para obtener nuevos valores de la resistencia. Se pueden conectar en serie, en paralelo o mediante otras combinaciones. La resistencia total de las diversas combinaciones se puede determinar experimentalmente tal como se ha explicado antes. Los programas de ordenador proporcionan una valiosa ayuda en este caso y en el estudio de los circuitos eléctricos en general, porque permiten a los estudiantes ensamblar y estudiar circuitos mucho más rápidamente que en el laboratorio.

En la Figura 5.38 se representan tres resistores distintos conectados en serie. La ley de conservación de la carga obliga a que la carga por segundo (intensidad de corriente) que entra en cada resistor sea la misma que la intensidad de corriente, *I*, que sale de este y que entra, a su vez, en el siguiente resistor.

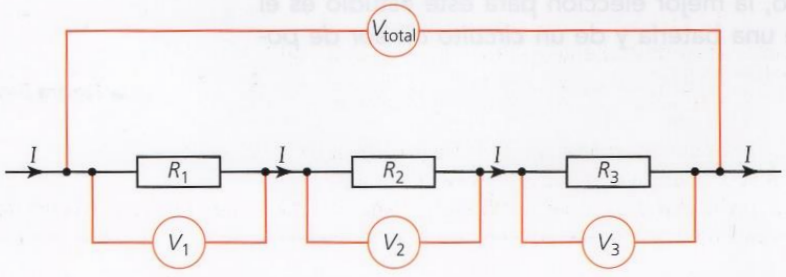


Figura 5.38
Tres resistores conectados en serie

La suma de las diferencias de potencial individuales debe ser igual a la diferencia de potencial total entre los tres conductores, V_{total}, por tanto:

$$V_{total} = V_1 + V_2 + V_3$$

Utilizando $V = IR$ para los resistores individuales, obtenemos $IR_{total} = IR_1 + IR_2 + IR_3$, y de ahí podemos derivar una ecuación para un único resistor, R, que tiene la misma resistencia que la combinación de resistores:

$$R_{total} = R_1 + R_2 + \ldots$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física.*

En la Figura 5.39 se representan los tres resistores conectados en paralelo.

Como están conectados entre los mismos dos puntos, están sometidos a la misma diferencia de potencial, V.

La ley de conservación de la carga significa que:

$$I_{total} = I_1 + I_2 + I_3$$

Y si aplicamos la relación $V = IR$ obtenemos:

$$\frac{V}{R_{total}} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$$

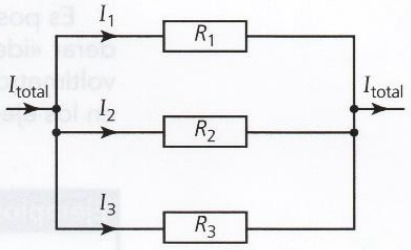


Figura 5.39
Tres resistores conectados en paralelo

Si eliminamos V obtenemos una ecuación para un resistor único, R_{total}, que tiene la misma resistencia que la combinación de resistores:

$$\frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física.*

Todo el equipamiento eléctrico de nuestros hogares está conectado en paralelo porque de esta forma cada dispositivo está conectado a la totalidad del voltaje suministrado y se puede controlar mediante un interruptor específico.

Ejemplos resueltos

10 Un resistor de 5000 Ω y otro de 8000 Ω están conectados en serie.
- **a** ¿Cuál es la resistencia combinada?
- **b** ¿Qué intensidad de corriente pasa a través de cada uno de ellos si están conectados a una batería de 4,5 V?
- **c** ¿Cuál es la diferencia de potencial entre los bornes del resistor de 5000 Ω?
- **d** Repite estos mismos cálculos en el caso de que los tres resistores estén conectados en paralelo.

a $5000 + 8000 = 13\,000\,\Omega$

b $I = \frac{V}{R} = \frac{4,5}{13\,000} = 3,5 \times 10^{-4}$ a través de ambos resistores

c $V = IR = 3,5 \times 10^{-4} \times 5000 = 1,7\,V$

d $\frac{1}{R} = \frac{1}{5000} + \frac{1}{8000} = \frac{13}{40\,000}$

$R = \frac{40\,000}{13} = 3080\,\Omega$

Ambos resistores tienen una d.p. de 4,5 V entre sus bornes.

la intensidad de corriente a través del resistor de 5000 Ω,

$I = \frac{V}{R} = \frac{4,5}{5000} = 9,0 \times 10^{-4}\,A$

la intensidad de corriente a través del resistor de 8000 Ω,

$I = \frac{V}{R} = \frac{4,5}{8000} = 5,6 \times 10^{-4}\,A$

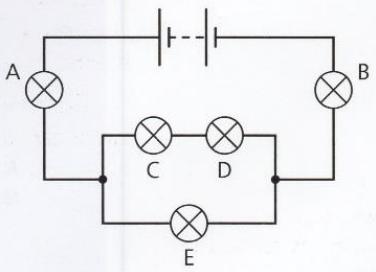


Figura 5.40

11 Las lámparas que se representan en la Figura 5.40 son todas iguales.
- **a** Compara la luminosidad de las diversas lámparas.
- **b** Si todas las lámparas tienen la misma resistencia constante de 2 Ω, ¿cuál es la resistencia total del circuito?

a Las lámparas A y B tendrán la misma luminosidad porque a través de ellas circula la misma intensidad de corriente. La lámpara E y las lámparas C y D darán una iluminación más tenue que A o B porque la intensidad de corriente se tiene que repartir en los nodos. Las lámparas C y D tienen la misma luminosidad porque están conectadas en serie. La lámpara E tendrá más luminosidad que la lámpara C o la D porque a través de ella circula una mayor intensidad de corriente.

b C y D juntas tendrán una resistencia de $2 + 2 = 4\,\Omega$.

E en paralelo con C/D tendrá una resistencia de $1{,}3\,\Omega$ ($\frac{1}{R} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4}$).

La resistencia total = $2 + 2 + 1{,}3 = 5{,}3\,\Omega$

Conexión de aparatos de medida en serie y en paralelo

Es posible que los aparatos de medida que se utilizan en un experimento no se puedan considerar «ideales». En este caso, se puede determinar el efecto de conectar un amperímetro o un voltímetro en un circuito tratándolo como si fuera una resistencia cualquiera, tal como se muestra en los ejemplos resueltos siguientes.

Ejemplos resueltos

12 **a** ¿Qué intensidad de corriente circula a través de un resistor conectado a una d.p. de 9,10 V?

b Para medir la intensidad de corriente se utiliza un amperímetro cuya resistencia es $0{,}31\,\Omega$. ¿Qué valor de la intensidad aparece en pantalla?

c ¿Cuál es el porcentaje de error cuando se mide esta intensidad de corriente?

a $I = \frac{V}{R} = \frac{9{,}10}{12{,}0} = 0{,}758\,\text{A}$

b $I = \frac{V}{R} = \frac{9{,}1}{12{,}31} = 0{,}739\,\text{A}$

c $\frac{0{,}739}{0{,}758} \times 100 = 97{,}5\%$. El porcentaje de error es del 2,5%.

13 Consideremos el circuito representado en la Figura 5.41.

a ¿Cuál es la intensidad de corriente que circula antes de conectar el voltímetro?

b ¿Cuál es el voltaje a través del resistor de $2000\,\Omega$?

c ¿Qué voltaje mediremos si conectamos al resistor de $2000\,\Omega$ un voltímetro cuya resistencia es:

i $5000\,\Omega$

ii $50\,000\,\Omega$?

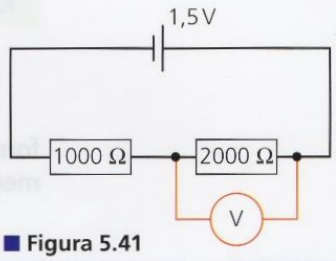


Figura 5.41

a $I = \frac{V}{R}$

$I = \frac{1{,}5}{(1000 + 2000)}$

$I = 5 \times 10^{-4}\,\text{A}\ (0{,}5\,\text{mA})$

b $V = IR$

$V = (5 \times 10^{-4}) \times 2000$

$V = 1{,}0\,\text{V}$

c **i** En primer lugar calculamos la resistencia combinada del resistor de $2000\,\Omega$ y el voltímetro de $5000\,\Omega$ conectados en paralelo:

$\frac{I}{R} = \frac{I}{R_1} + \frac{I}{R_2}$

$\frac{I}{R} = \frac{1}{2000} + \frac{1}{5000}$

$R = 1\,430\,\Omega$

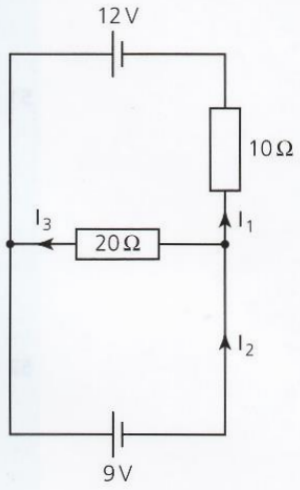
A continuación calculamos el voltaje a través de una resistencia de $1430\,\Omega$ conectada en serie con una resistencia de $1000\,\Omega$:

$V = 1{,}5 \times \frac{1430}{1430 + 1000}$

$V = 0{,}88\,\text{V}$ (En lugar del valor 1,0 V predicho en **b**)

ii Si repetimos los cálculos para un voltímetro de $50\,000\,\Omega$ el resultado es $V = 0{,}99\,\text{V}$, un valor más ajustado porque está mucho más cerca del valor predicho sin el voltímetro.

14 Utiliza las leyes de Kirchhoff para determinar las tres intensidades de corriente desconocidas del circuito representado en la Figura 5.42.



■ **Figura 5.42**

Por lo general, para resolver este tipo de problemas es necesario plantear tantas ecuaciones como incógnitas (en este caso tres). Es posible que desconozcamos los sentidos de las intensidades de corriente y que, por tanto, los sentidos asignados en el esquema sean solo suposiciones. Sin embargo, esto no importa porque si los elegimos de forma incorrecta el valor calculado de la intensidad de corriente será correcto en cuanto a módulo pero tendrá signo negativo (como veremos en este ejemplo).

1 Mediante la primera ley de Kirchhoff: $I_2 = I_1 + I_3$

2 Mediante la segunda ley de Kirchhoff para el bucle superior del circuito: $12 = 10I_1 + 20(-I_3)$

A la intensidad de corriente I_3 le hemos otorgado signo negativo porque en el esquema va hacia el lado positivo de la pila y no en el sentido convencional.

3 Mediante la segunda ley de Kirchhoff para el bucle inferior del circuito: $9 = 20(-I_3)$

4 La segunda ley de Kirchhoff también se puede aplicar al circuito externo, pero no proporciona mayor información adicional que la combinación de las ecuaciones 2 y 3: $12 - 9 = 10I_1$

A partir de la ecuación 4 podemos ver que $I_1 = 0{,}3\,A$

A partir de la ecuación 3 podemos ver que $I_3 = -0{,}45\,A$

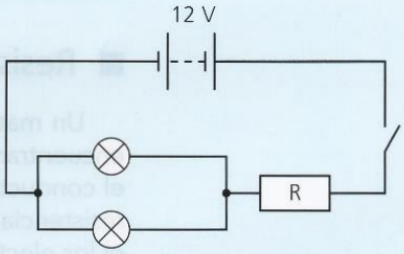
Por tanto $I_2 = I_1 + I_3 = 0{,}3 + (-0{,}45) = -0{,}15\,A$

Los dos signos negativos nos indican que los sentidos que habíamos escogido para I_3 y I_2 eran incorrectos.

46 Las dos lámparas que se muestran en la Figura 5.43 tienen una misma resistencia de 4,0 Ω cuando están frías, y una resistencia de 6,0 Ω cuando funcionan normalmente sometidas a una d.p. de 6,0 V.

a ¿Qué valor debe tener el resistor R para que las lámparas funcionen normalmente?

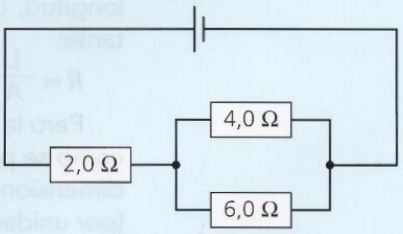
b ¿Cuál es la d.p. a través de las lámparas cuando se enciende por primera vez el interruptor?



■ **Figura 5.43**

47 Un calefactor eléctrico que funciona conectado a la red está compuesto por un elemento térmico, un ventilador y una lámpara que indica si el elemento térmico está encendido. El ventilador siempre debe estar encendido cuando el elemento térmico lo está, pero también puede darse la situación de que el ventilador esté encendido y el elemento térmico apagado. Dibuja un circuito con un conmutador de dos posiciones que represente la conexión de todos estos elementos.

48 Considera el circuito representado en la Figura 5.44. ¿En qué resistor se disipa potencia a una tasa más elevada? Razona tu respuesta.



■ **Figura 5.44**

49 Un calefactor eléctrico conectado a la red de 220 V tiene un conmutador con 3 posiciones: alto, medio y bajo. En su interior hay dos elementos térmicos de 40,0 Ω.

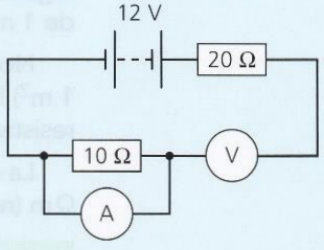
a Explica mediante diagramas cómo se pueden conseguir tres tipos de potencias de salida con solo dos elementos térmicos.

b Calcula la potencia de salida para cada una de las tres posiciones del conmutador.

50 En la Figura 5.45 se representa un circuito simple en el cual el amperímetro y el voltímetro se han conectado incorrectamente.

a ¿Qué lecturas (aproximadas) esperas ver en los medidores? Razona tu respuesta.

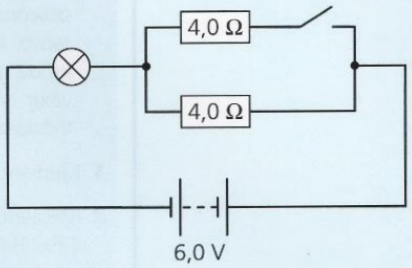
b Si los medidores se conectan en los lugares adecuados, ¿qué lecturas esperas ver en este caso?



■ **Figura 5.45**

c La lectura real del voltímetro es 3,9 V. Sugiere un motivo por el que es menor que la esperada.
d Calcula la resistencia del voltímetro.
e ¿Qué supuesto(s) has tenido en cuenta con respecto al amperímetro?

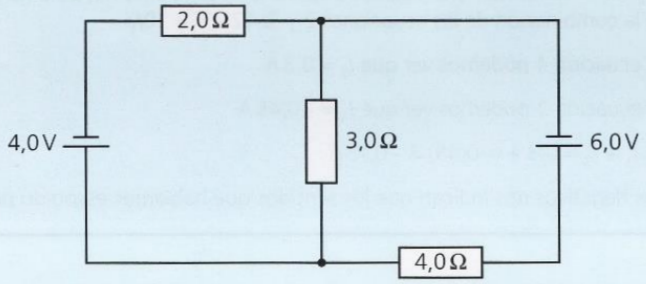
51 Por el circuito representado en la Figura 5.46 circula una intensidad de corriente de 830 mA a través de la lámpara cuando el interruptor está cerrado.
a ¿Cuál es la d.p. entre los bornes de la lámpara?
b Calcula la resistencia y la potencia de la lámpara en estas condiciones.
c Explica qué le sucede a la luminosidad de la lámpara si se abre el interruptor.
d Calcula la nueva d.p. a través de la lámpara.



■ **Figura 5.46**

52 Se unen los dos extremos de un hilo de resistencia de 1 m de longitud formando un círculo. Un alumno lleva a cabo un estudio para determinar la variación de la resistencia entre dos puntos cualesquiera del círculo en función de la longitud de hilo entre ambos puntos. Esboza una gráfica para representar los resultados que cabe esperar de este estudio.

53 Determina los módulos y los sentidos de las intensidades de corriente del circuito representado en la figura 5.47.



■ **Figura 5.47**

■ Resistividad

Un material presenta resistencia eléctrica porque los electrones que circulan a través de él se encuentran en su trayectoria con átomos o iones vibrando (véase Figura 5.13). Cuanto más largo es el conductor, mayor es la probabilidad de que se produzcan «colisiones» y, por tanto, mayor es la resistencia que presenta. Cuanto más grueso es el conductor, más fácilmente circulan a través de él los electrones, por tanto, menor es la resistencia que presenta.

Los experimentos para determinar la resistencia de hilos conductores de distintas longitudes y diámetros indican que la resistencia de un hilo (del mismo metal o aleación) es proporcional a su longitud, L, e inversamente proporcional al área de su sección transversal, A, a temperatura constante:

$$R \propto \frac{L}{A}$$

Pero la resistencia también depende del metal o de la aleación concreta que se esté utilizando, como se puede demostrar fácilmente midiendo la resistencia de hilos conductores con las mismas dimensiones, pero fabricados con distintos metales o aleaciones. Cuantos más electrones libres (por unidad de volumen) haya en el material, n, mejor conductor de la corriente eléctrica será este material. No se trata de consultar cuál es la resistencia del material (como el cobre, por ejemplo) en una tabla de datos, porque la resistencia depende tanto de la forma como del material en sí. En lugar de eso buscamos la **resistividad** del material, que es la resistencia de una muestra de material de 1 m de longitud y 1 m^2 de área transversal (tal como se define en la ecuación inferior).

No debería sorprendernos que (suponiendo un hilo conductor ideal con un área transversal de 1 m^2) la resistividad de un buen conductor tenga un valor numérico muy pequeño. Por ejemplo, la resistividad del cobre es $1{,}7 \times 10^{-8}\,\Omega m$ a 20 °C.

La resistividad se representa con el símbolo ρ y su unidad es el ohmio multiplicado por el metro, Ωm (no es ohmios *por* metro, en el sentido de cociente):

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Se puede determinar y comparar la resistividad de los distintos materiales mediante la medida de resistencias de hilos (o lápices de grafito) de dimensiones conocidas. Si se conoce la resistividad del grafito, su valor se puede introducir en la ecuación anterior para estimar el grosor de la línea dibujada sobre el papel con un lápiz de grafito.

La resistencia y la resistividad normalmente varían con la temperatura, a veces de forma significativa, de manera que debemos ser cuidadosos a la hora de describir un material como aislante o como conductor sin precisar la temperatura a la que se comporta de una manera u otra. Las resistividades de los diversos materiales pueden tomar valores en un amplísimo intervalo, tal como se muestra en la tabla 5.2. Las resistividades del silicio y del germanio, materiales semiconductores, se encuentran en la mitad del intervalo.

Material	Resistividad/Ωm
plata	$1{,}6 \times 10^{-8}$
cobre	$1{,}7 \times 10^{-8}$
aluminio	$2{,}8 \times 10^{-8}$
hierro	$1{,}0 \times 10^{-7}$
nicromo (se utiliza en los calentadores eléctricos)	$1{,}1 \times 10^{-6}$
carbono (grafito)	$3{,}5 \times 10^{-5}$
germanio	$4{,}6 \times 10^{-1}$
agua de mar	$\approx 2 \times 10^{-1}$
silicio	$6{,}4 \times 10^{2}$
vidrio	$\approx 10^{12}$
cuarzo	$\approx 10^{17}$
teflón (PTFE)	$\approx 10^{23}$

Tabla 5.2
Resistividades de diversas sustancias a 20 °C

Ejemplos resueltos

15 **a** Calcula la resistencia de un hilo conductor de hierro de 1,80 m de longitud y área transversal 2,43 mm^2.
b Cuando se aplica una d.p. de 220 V entre los extremos de un hilo conductor fabricado con una aleación metálica de 83 cm de longitud y 0,54 mm^2 de área transversal circula una corriente de intensidad 2,4 A. ¿Cuál es la resistividad de la aleación?

a $R = \dfrac{\rho L}{A}$

$R = \dfrac{(1{,}0 \times 10^{-7}) \times 1{,}80}{(2{,}43 \times 10^{-6})}$

$R = 7{,}4 \times 10^{-2}\,\Omega$

b $R = \dfrac{V}{I} = \dfrac{220}{2{,}4} = 91{,}7\,\Omega$

$\rho = \dfrac{RA}{L}$

$\rho = \dfrac{91{,}7 \times (5{,}4 \times 10^{-7})}{0{,}83}$

$\rho = 6{,}0 \times 10^{-5}\,\Omega\text{m}$

16 Sugiere posibles motivos por los que se acostumbra a utilizar aluminio (y no cobre) en los cables que transportan intensidades de corriente elevadas por todo el mundo.

El cociente de las resistividades de estos dos metales es 2,8/1,7 = 1,6. Esto significa que un hilo conductor de aluminio conduce tan bien como uno de cobre si su área transversal es 1,6 veces mayor. El aluminio es una elección mejor porque es mucho más barato que el cobre y los cables de aluminio (con la misma resistencia) son más ligeros que los de cobre.

El cobre tiene otras propiedades que lo hacen preferible para el cableado doméstico, como su flexibilidad. Existen otros metales, como la plata, el oro y el platino, que son mejores conductores que el cobre, pero mucho más caros. Se utilizan en ocasiones cuando se necesita un hilo conductor o una conexión de muy baja resistencia (por ejemplo en algunos sistemas de reproducción de sonido).

54 **a** ¿Qué longitud de hilo de nicromo de área transversal 0,0855 mm² se necesita para fabricar un resistor de 15,0 Ω?
b ¿Qué resistencia presentaría un resistor fabricado con un hilo de nicromo que tuviera el doble de longitud y la mitad de diámetro que el del apartado anterior?

55 Sugiere la posible relación que existe entre la resistividad de un metal y el número de electrones libres que contiene por milímetro cúbico.

56 El hilo de nicromo que constituye el elemento térmico de un calentador eléctrico tiene una longitud total de 5,32 m. Si su resistencia es 25 Ω, ¿cuál es el diámetro del hilo?

57 Calcula la resistividad de un hilo conductor metálico si se necesita un voltaje de 2,5 V para que circule una intensidad de corriente de 26 mA a través de un hilo de diámetro 0,452 mm y longitud 745 cm.

Aplicaciones

Tecnología de las pantallas táctiles

Las pantallas táctiles (Figura 5.48) se han hecho muy populares en dispositivos como los teléfonos móviles o las tabletas, porque permiten al usuario controlar la pantalla directamente, sin necesidad de teclado o de ratón.



Figura 5.48
Una tableta con pantalla táctil

En el funcionamiento de las pantallas táctiles se utilizan diversas tecnologías, entre las cuales se encuentran las asociadas a las propiedades resistivas de la pantalla. Cuando un objeto cualquiera, como un dedo, toca la pantalla, la resistencia en ese punto cambia y el controlador central calcula la ubicación. Si el dedo se desplaza, se detectan nuevas ubicaciones de manera que se calcula la velocidad y la dirección del movimiento, que se utilizan a su vez para controlar el aparato. Las pantallas táctiles multipunto pueden responder a dos o más toques a la vez. Uno de los problemas de las pantallas táctiles resistivas es el hecho de que la pantalla reduce la calidad de la imagen.

Otra de las tecnologías que se emplean frecuentemente en las pantallas táctiles utiliza los cambios en la capacitancia (capacidad de almacenar carga) en el punto donde tocamos la pantalla. En este caso la pantalla debe ser tocada por un elemento conductor, como un dedo.

1 Escoge una pantalla táctil de teléfono móvil, tableta u otro dispositivo y averigua qué tecnología emplea.

2 ¿Se te ocurre alguna desventaja del uso de dispositivos con pantalla táctil?

Disipación de potencia

Si la intensidad de corriente que circula por un resistor es, por ejemplo, 3 A, esto significa que pasan 3 C de carga cada segundo. Si hay una diferencia de potencial de 6 V entre los extremos del resistor, cada culombio transfiere 6 J de energía (en forma de energía interna). La tasa de transferencia de energía es 3 x 6 = 12 julios cada segundo (vatios).

Podemos derivar una expresión general para la potencia disipada en forma de energía interna en un resistor considerando la definición de intensidad de corriente y de diferencia de potencial de la manera siguiente:

$$\frac{\text{energía transferida}}{\text{tiempo}} = \frac{\text{energía transferida en el resistor}}{\text{carga que circula a través del resistor}} \times \frac{\text{carga que circula a través del resistor}}{\text{tiempo}}$$

$$\frac{W}{t} = \frac{W}{q} \times \frac{q}{t}$$

o bien:

potencia = diferencia de potencial x intensidad de corriente

$$P = VI$$

Como $V = IR$, esta expresión se puede reescribir como $P = (IR)\,I$, o bien:

$$P = I^2R$$

De forma alternativa, $P = V(V/R)$, o bien:

$$P = \frac{V^2}{R}$$

Estas tres formas de la misma ecuación figuran en el *Apéndice de datos de Física*.

Para calcular la energía transferida total en un tiempo determinado sabemos que energía = potencia x tiempo, de manera que:

energía eléctrica = VIt

Esta ecuación *no* figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Ejemplo resuelto

17 Una plancha eléctrica lleva una etiqueta que pone 220 V, 1 200 W.

a Explica cuál es el significado de esta etiqueta.

b ¿Cuál es la resistencia del elemento térmico de la plancha?

c Explica qué sucedería si se utilizara esta plancha en un país donde el voltaje de la red es 110 V.

a La etiqueta indica que la plancha está diseñada para ser utilizada a 220 V y, si está bien conectada, transferirá una energía a una tasa de 1200 julios cada segundo.

b $P = \frac{V^2}{R}$

$1200 = \frac{220^2}{R}$

$R = 40{,}3\,\Omega$

c $P = \frac{V^2}{R}$

Por tanto:

$P = \frac{110^2}{40{,}3}$

$P = 300\,\text{W}$

La plancha transferiría energía a una tasa que sería una cuarta parte de la tasa óptima para la que está diseñada, de manera que no se calentaría lo suficiente para funcionar como es debido. ($P = VI$, y tanto la d.p. como la intensidad de corriente se dividirían por la mitad, suponiendo que la resistencia fuera constante).

Si se conectara una plancha diseñada para funcionar a 110 V a un voltaje de 220 V, comenzaría a transferir energía a una tasa cuatro veces superior a la tasa para la que estaba diseñada, con lo cual se sobrecalentaría y se estropearía.

58 Se aplica una diferencia de potencial de 12 V a los extremos de un resistor de 240 Ω.
- **a** Calcula:
  - **i** la intensidad de corriente
  - **ii** la potencia
  - **iii** la energía total transferida en 2 minutos.
- **b** ¿Qué valor del resistor produciría el doble de potencia con el mismo voltaje?

59 Un calentador de agua de uso doméstico de 2,00 kW tiene una resistencia de 24,3 Ω.
- **a** ¿Qué intensidad de corriente circula a través del calentador?
- **b** ¿Cuál es el voltaje de la red?

60 **a** ¿Cuál es la tasa de producción de energía térmica cuando circula una intensidad de 100 A por un cable aéreo de 20 km de longitud y una resistencia de 0,001 ohmios por metro?
- **b** Comenta tu respuesta.

61 **a** ¿Qué potencia debe tener un calentador eléctrico para aumentar la temperatura de un bloque metálico de masa 2,3 kg desde 23 °C hasta 47 °C en 4 minutos (capacidad calorífica específica = 670 $J kg^{-1} °C^{-1}$)?
- **b** Dibuja un diagrama de circuito donde se represente cómo se debería conectar el calentador a un generador de 12 V y a los medidores eléctricos adecuados para poder verificar la potencia.

62 **a** Se emplea un motor eléctrico para levantar una masa de 50 kg hasta una altura de 2,5 m en 74 s. Se suministra al motor un voltaje de 240 V, pero la eficiencia del motor es solo del 8%. ¿Cuál es la intensidad de corriente que circula por el motor?
- **b** Sugiere dos razones por las que el motor es poco eficiente.

63 **a** ¿Qué valor de la resistencia se necesita para fabricar un calentador de agua de 1,25 kW en un país donde el voltaje de la red es 110 V?
- **b** ¿Qué intensidad de corriente circula a través del calentador durante su uso normal?
- **c** Sugiere por qué circula una mayor intensidad de corriente cuando se enciende por primera vez.

Otra unidad para la energía eléctrica

Cuando compramos una pila o pagamos la factura de la «red eléctrica» conectada a nuestros hogares, en realidad estamos comprando energía. En la mayoría de países la energía eléctrica se comercializa en **kilovatios hora**: 1 kWh es la cantidad de energía transferida por un dispositivo de 1 kW de potencia en una hora, es decir, el equivalente a 1000 Js^{-1} en 3600 s, o 3,6 MJ. Este factor de conversión figura en el *Apéndice de datos de Física*.

64 **a** Utiliza la relación energía = *VIt* para estimar cuánta energía útil puede transferir una pila tipo AA.
- **b** ¿Cuál es el coste aproximado de esta energía por MJ?

65 **a** ¿Cuánto cuesta 1 kWh de uso doméstico en tu país?
- **b** Consulta Internet para comparar los precios en tu país con los de otros países.
- **c** ¿Cuánto cuesta 1 MJ de energía eléctrica procedente de la red en tu país? Por comparación, debería quedar claro que la compra de pilas desechables es una manera muy cara de pagar la energía y el suministro. Además, los residuos generados por las pilas desechables constituyen un problema de contaminación medioambiental.

66 En el Capítulo 8 trataremos el efecto sobre el medio ambiente de la producción y el uso de la energía eléctrica. Existen enormes diferencias respecto a la cantidad de energía que se utiliza en los distintos países. Un modo de frenar el uso excesivo de la electricidad en los países desarrollados es mediante el aumento por ley del precio del kWh para aquellos hogares que gastan más energía.

Explica las ventajas y las desventajas del sistema de precios para la electricidad que se menciona en el párrafo anterior.

Circuito divisor de potencial

Cuando conectamos dos o más resistores en serie, la diferencia de potencial total se reparte entre los resistores proporcionalmente a la magnitud de su resistencia (tal como se vio en el Ejemplo resuelto 10). Cuando esta disposición de resistores se utiliza de forma deliberada para controlar las diferencias de potencial en un circuito, se denomina **divisor de potencial**.

Por regla general uno de los dos resistores es variable, tal como se muestra en el Ejemplo resuelto 18.

Ejemplo resuelto

18 El valor de la resistencia del resistor variable de la Figura 5.49 se puede cambiar de forma continua desde 1 kΩ hasta 10 kΩ. ¿Cuál es la diferencia de potencial máxima y mínima, V_{salida}, que se puede obtener a través de R?

Si la resistencia variable toma el valor 1 kΩ,

$$V_{salida} = \frac{6 \times 5}{5 + 1} = 5\,V$$

Si la resistencia variable toma el valor 10 kΩ,

$$V_{salida} = \frac{6 \times 5}{5 + 10} = 2\,V$$

V_{salida} puede ser un voltaje que controla otra parte del circuito, por ejemplo algún tipo de interruptor electrónico que puede estar encendido si el voltaje es, por ejemplo, superior a 4 V, y apagado si es inferior a 3 V. De esta manera, se puede abrir o cerrar otro circuito cambiando el valor del resistor variable de este *divisor de potencial*.

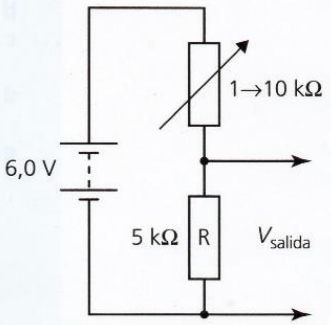


Figura 5.49

Sensores

Los divisores de tensión se emplean a menudo en los sistemas de control automático que utilizan un **sensor** como resistor variable. Un sensor es un componente eléctrico que responde a un cambio en una propiedad física (la temperatura, por ejemplo) con un cambio proporcional en una propiedad eléctrica (normalmente la resistencia).

Existen sensores para la detección de la mayoría de las propiedades físicas que hemos tratado en este libro, aunque nos limitaremos a estudiar tres sensores en particular.

- **Resistores dependientes de la luz (LDR, por sus siglas en inglés)** (Figura 5.50): la resistencia de un LDR disminuye a medida que el aumento de la intensidad de la luz proporciona la energía necesaria para liberar más electrones libres en sus materiales semiconductores.
- **Resistores dependientes de la temperatura (termistores)** (Figura 5.51): la resistencia de un termistor varía con los cambios de temperatura. La resistencia puede aumentar o disminuir, dependiendo de los materiales que se hayan empleado en la fabricación de cada termistor.
- **Extensómetros** (Figura 5.52): la resistencia de un extensómetro varía cuando cambia su forma (recordemos que $R = \rho L/A$).



Figura 5.50
Un LDR

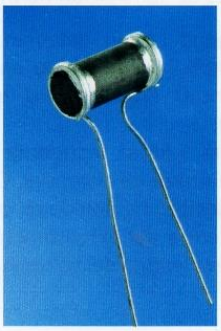


Figura 5.51
Un termistor

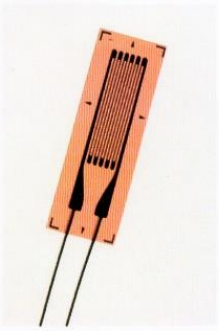


Figura 5.52
Un extensómetro

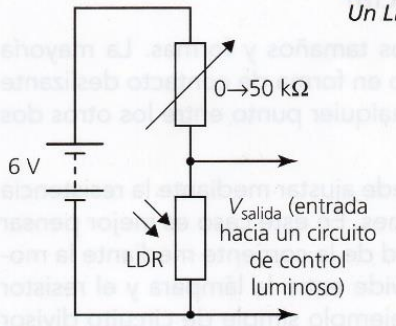
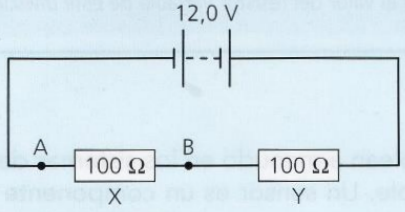


Figura 5.53
Un LDR en un circuito divisor de potencial

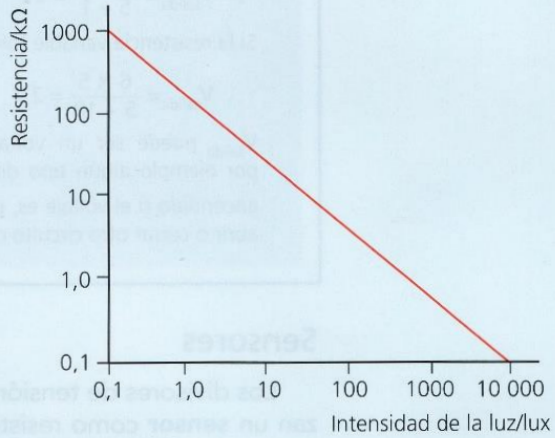
En la Figura 5.53 se representa un LDR conectado como parte de un circuito divisor de potencial. Cuando la intensidad de la luz aumenta, la resistencia del LDR disminuye y, por tanto, el voltaje entre sus extremos, V_{salida}, también disminuye. Este voltaje V_{salida} se puede utilizar para controlar un interruptor electrónico que encienda las luces cuando la intensidad de la luz alcance un determinado nivel que, a su vez, se puede cambiar ajustando el valor del resistor variable.

Un termistor conectado en un circuito análogo se puede utilizar para encender un calefactor cuando la temperatura cae por debajo de un valor determinado o bien para apagarlo cuando hace demasiado calor. Cuando se utiliza para controlar la temperatura, el termistor forma parte de un **termostato**.

67 **a** ¿Cuál es la diferencia de potencial entre los puntos A y B de la Figura 5.54?
b Un estudiante desea conectar una lámpara catalogada con 15 W y 6 V. ¿Cuál es la resistencia teórica de la lámpara?
c El estudiante piensa que la lámpara funcionará normalmente si la conecta entre A y B, en paralelo con X. Explica por qué no funcionará como espera.
d Otro estudiante piensa que la lámpara funcionará si se quita el resistor X del circuito (manteniendo la lámpara conectada entre A y B). Calcula el voltaje a través de la lámpara. ¿Funcionará ahora normalmente?
e Sugiere cómo podría funcionar normalmente la lámpara usando una batería de 12 V.



■ **Figura 5.54**

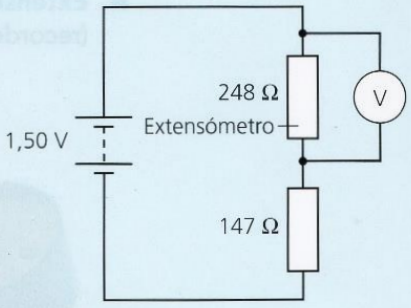


■ **Figura 5.55**
Gráfica resistencia – intensidad para un LDR

68 **a** Dibuja un circuito divisor de potencial que se pueda usar para controlar la temperatura de un frigorífico.
b Haz una lista de aparatos eléctricos que contengan termostatos.

69 En la Figura 5.55 se representa la respuesta a los cambios en la intensidad luminosa de un determinado LDR fabricado con un material semiconductor. La resistencia del LDR es de unos 1 300 Ω para la iluminación normal de una habitación (400 lux).
a Explica por qué disminuye la resistencia a medida que aumenta la intensidad de la luz.
b Las escalas de la gráfica son logarítmicas. Explica por qué se utiliza este tipo de escala.
c Escribe una ecuación para la recta de la gráfica.
d Calcula la resistencia del LDR cuando la intensidad de la luz es 200 lux.
e Si el LDR se conecta como en la Figura 5.53, ¿qué valor de la resistencia variable produce una d.p. de 1,2 V a través del LDR en condiciones de iluminación normales de una habitación?

70 **a** Si la longitud de un determinado conductor se incrementa en un 1,00%, ¿qué cambio en porcentaje cabría esperar en su resistencia? (Supongamos que su volumen se mantiene constante).
b En la Figura 5.56 se representa un extensómetro conectado a un circuito divisor de potencial. Calcula la lectura del voltímetro. ¿Qué supuesto(s) has tenido en cuenta respecto al voltímetro?
c Si la resistencia del extensómetro aumenta un 0,570%, ¿cuál será la nueva lectura del voltímetro?



■ **Figura 5.56**

Uso de un resistor variable como divisor de potencial



■ **Figura 5.57**
Una selección de resistores variables

Los resistores variables (Figura 5.57) se fabrican con diversos tamaños y formas. La mayoría poseen tres bornes, uno en cada extremo del resistor y un tercero en forma de contacto deslizante que se puede desplazar a lo largo del resistor para situarlo en cualquier punto entre los otros dos bornes.

La intensidad luminosa de la bombilla de la Figura 5.58 se puede ajustar mediante la resistencia variable. Hasta ahora solo hemos considerado el uso de dos bornes. En este caso es mejor pensar en un resistor variable como en una manera de variar la intensidad de la corriente mediante la modificación de la resistencia de un circuito en serie. La d.p. se divide entre la lámpara y el resistor variable, lo que significa que el circuito de la Figura 5.58 es un ejemplo simple de circuito divisor de potencial. El rango de la resistencia variable se debe elegir cuidadosamente según el uso que se le vaya a dar.

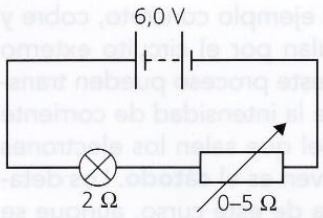


Figura 5.58
Uso de una resistencia variable para modificar la intensidad de corriente de un circuito

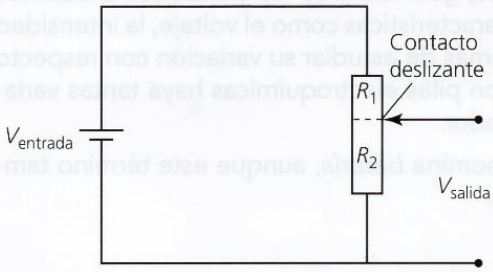


Figura 5.59
Uso de un resistor variable como potenciómetro

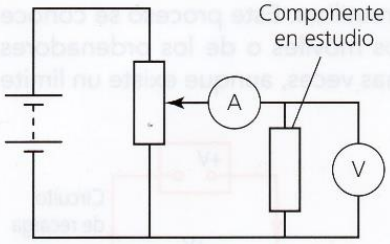


Figura 5.60
Circuito para estudiar la respuesta característica I-V de un componente eléctrico

A modo de ejemplo, consideremos el resistor variable con el rango 0-5 Ω que se utiliza para controlar una lámpara de resistencia fija de 2,0 Ω diseñada para un uso normal cuando está sometida a una d.p. de 6 V. Cuando el valor de la resistencia se fija a 0 Ω, la lámpara está sometida a la d.p. total de 6 V y cuando el valor de la resistencia es máximo, 5 Ω, la lámpara está sometida a una d.p. de (2,0/7,0) x 6,0 = 1,7 V. Es imposible reducir a cero la d.p. a través de la lámpara.

Se podrían obtener d.p. inferiores con una resistencia variable que tuviera un rango mucho mayor, pero en ese caso sería más difícil realizar ajustes para voltajes más altos.

La alternativa consiste en conectar un resistor variable a una pila utilizando los tres bornes, tal como se representa en la Figura 5.59. De esta manera, el resistor puede proporcionar una diferencia de potencial (V_{salida}) a otra parte del circuito, que varía de forma continua desde el valor cero hasta el valor máximo de la pila ($V_{entrada}$). El valor máximo del voltaje se obtendrá cuando el contacto deslizante esté en la parte superior del resistor variable, mientras que el voltaje será cero cuando el contacto esté en la parte inferior. Un resistor variable utilizado de este modo se denomina **potenciómetro**.

Se trata fundamentalmente de un divisor de potencial cuyo contacto deslizante divide el resistor variable en dos resistores de magnitudes variables (representados por R_1 y R_2, siendo $R_1 + R_2$ constante).

Cuando se conecta un potenciómetro como entrada en un circuito, no se puede calcular el valor de V_{salida} sin tener en cuenta el efecto de la resistencia sobre el resto del circuito. Por regla general, la resistencia del circuito debe ser mucho mayor que la resistencia del potenciómetro.

La mejor manera de modificar el voltaje de un componente para estudiar su respuesta característica *I-V*, es mediante la conexión de un potenciómetro (véase Figura 5.60).

71 **a** Dibuja un circuito que utilice un potenciómetro y una pila de 12 V para suministrar un voltaje de entrada que varíe desde 0 hasta 12 V, para una pequeña lámpara en cuya etiqueta figuran los valores 12 V y 1,5 W.
b Cataloga la lámpara con el valor de su resistencia (supón que es constante).
c Sugiere un rango adecuado para el potenciómetro.
d Si se utiliza un potenciómetro cuyo rango operativo está entre 0 y 200 V, estima la d.p. a la que está sometida la lámpara cuando el potenciómetro funciona en el punto medio de su rango operativo.
e Explica por qué la respuesta al apartado **d** no es 6 V.

5.3 Pilas eléctricas

Las pilas eléctricas nos permiten almacenar energía en forma química

Pilas

En el mundo actual, en el que se utilizan tantos dispositivos móviles, cada vez somos más dependientes de las fuentes compactas y portátiles de energía eléctrica. Una **pila eléctrica** (también denominada **pila electroquímica**) es un componente que utiliza reacciones químicas para trasferir energía (potencial) química a la energía transferida por una corriente eléctrica. A las pilas eléctricas también se las denomina *pilas voltaicas* (en honor de Alessandro Volta, el científico italiano a quien se le atribuye el diseño de las primeras pilas eléctricas operativas). El principio básico se puede observar introduciendo dos metales distintos en una solución conductora de la electricidad (un **electrolito**), tal como se representa en la Figura 5.61.

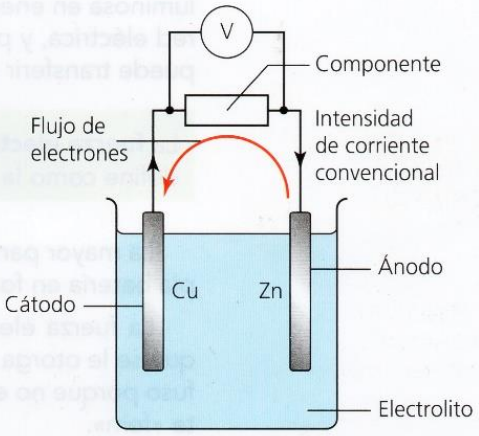


Figura 5.61
Una pila electroquímica simplificada

Los dos conductores que hacen contacto con el electrolito (en este ejemplo concreto, cobre y cinc) se denominan **electrodos**. En la Figura 5.61 los electrones circulan por el circuito externo desde el electrodo de cinc hacia el electrodo de cobre, y a lo largo de este proceso pueden transferir energía útil al circuito. Recordemos que el sentido convencional de la intensidad de corriente se toma en sentido contrario al del flujo de electrones. El electrodo del que salen los electrones para viajar por el circuito se denomina **ánodo** y el electrodo al que vuelven es el **cátodo**. Los detalles del diseño de las pilas o de las reacciones químicas *no* son materia de este curso, aunque se incluyen en el curso de Química para el IB.

Se pueden llevar a cabo numerosos estudios con pilas simples: perfeccionar el diseño con un *puente de sal*, utilizar distintos conductores, temperaturas, geometría de los electrodos o distintos electrolitos (o concentraciones). Se pueden determinar características como el voltaje, la intensidad de corriente y la potencia suministrada a un circuito, además de estudiar su variación con respecto al tiempo. El hecho de que en los estudios realizados con pilas electroquímicas haya tantas variables, hace muy aconsejables las simulaciones por ordenador.

La conexión de dos o más pilas en un circuito se denomina *batería*, aunque este término también se utiliza de forma generalizada para una única pila.

Pilas (baterías) recargables

Las pilas simples que solo se pueden utilizar hasta que se detienen las reacciones químicas en su interior se denominan **pilas primarias**. En las **pilas recargables** (o *pilas secundarias*) las reacciones químicas se pueden revertir, de manera que la pila se puede reutilizar. Este proceso se conoce como **recarga** de una pila (batería). Las baterías de los teléfonos móviles o de los ordenadores portátiles son recargables, y este proceso se puede efectuar muchas veces, aunque existe un límite en el número de recargas. La recarga de una batería puede durar varias horas. La vida útil de las baterías recargables y el tiempo necesario para su recarga son objeto incesante de investigación tecnológica. El uso de pilas primarias ha descendido de forma significativa en los últimos años.

Para recargar una pila (batería) recargable se debe hacer circular a través de ella una intensidad de corriente en sentido contrario al de la intensidad de corriente que circula cuando la batería se usa normalmente. El voltaje de recarga normalmente es el mismo que el voltaje producido por la pila en su uso normal (véase Figura 5.62).

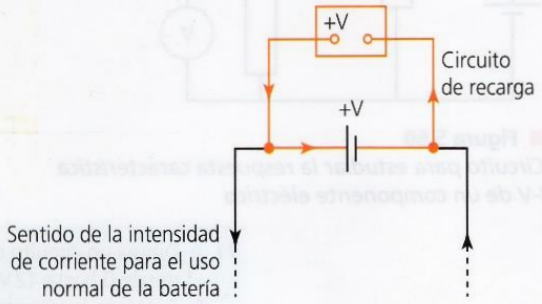


Figura 5.62
Recarga de una batería

Conexión de una batería a un circuito

Fuerza electromotriz (fem)

Las pilas electroquímicas utilizan las reacciones químicas para suministrar diferencias de potencial y energía a los circuitos, pero existen otros dispositivos que pueden suministrar diferencias de potencial a partir de procesos distintos. Las células fotovoltaicas, por ejemplo, transforman energía luminosa en energía eléctrica; nuestros hogares reciben el voltaje y la energía suministrados por la red eléctrica, y producidos por generadores en las centrales eléctricas; la dinamo de una bicicleta puede transferir energía cinética en forma de energía eléctrica para iluminar la lámpara.

La **fuerza electromotriz** (**fem**) de una batería (o de cualquier otra fuente de energía eléctrica) se define como la energía total transferida por la fuente por unidad de carga circulante.

La mayor parte de esta energía es suministrada al circuito, pero una parte se transfiere a la propia batería en forma de energía interna.

La fuerza electromotriz es una diferencia de potencial (energía transferida/carga). El símbolo que se le otorga es ε y su unidad es el voltio, V. El término *fuerza electromotriz* puede resultar confuso porque no es una fuerza. Para evitar esta confusión habitualmente se le denomina simplemente «fem».

Diferencia de potencial entre bornes

Es importante comprender que, cuando circula una corriente por un circuito, la diferencia de potencial entre los bornes de la batería (o de cualquier otra fuente de alimentación) *no* equivale a su fem. La d.p. a través de la batería es la misma que la d.p. suministrada al circuito y se denomina **diferencia de potencial entre bornes.** Cuando circula una corriente eléctrica, la d.p. entre bornes es menor que la fem a causa de la *resistencia interna* de la fuente de energía.

Resistencia interna

Las pilas, baterías y demás fuentes de energía eléctrica no son conductores perfectos de la electricidad. Todos los materiales con los que están fabricadas tienen resistencia, denominada **resistencia interna** de la pila, para la que se utiliza el símbolo *r*. La resistencia interna de la pila nueva que compramos para una linterna puede ser de 1 ohmio aproximadamente.

Si la resistencia interna de una pila (Figura 5.63) es mucho menor que la resistencia del resto del circuito, su efecto puede ser ignorado y, en consecuencia, en muchas preguntas de examen se habla de pilas o baterías con «resistencia interna despreciable». En otros ejemplos, en cambio, puede ocurrir que la energía interna de una fuente de energía tenga un efecto significativo sobre el circuito. El valor de la resistencia interna de una batería puede variar en función de la intensidad de corriente que circule por ella, pero normalmente suponemos que es constante.

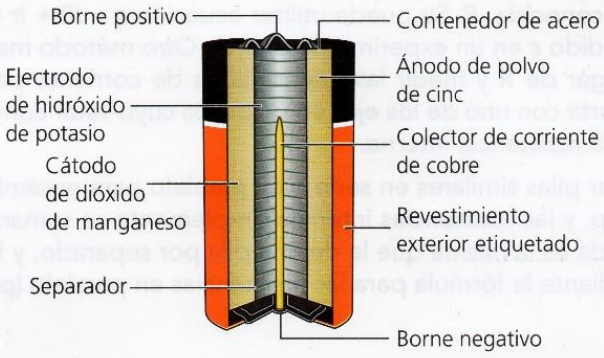


Figura 5.63
La resistencia interna de una pila proviene de las sustancias químicas que hay en su interior

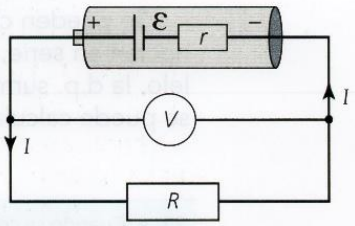


Figura 5.64
Una pila en un circuito simple

Consideremos la Figura 5.64. Cuando la corriente circula por la pila, parte de su energía se transfiere en forma de energía interna como consecuencia de su resistencia interna, por tanto:

energía total transferida por la pila (por culombio) = energía transferida al circuito (por culombio) + energía transferida al interior de la pila (por culombio)

fem de la pila, ε = d.p. entre bornes a través del circuito, V + «voltios perdidos» a causa de la resistencia interna de la batería

La intensidad de corriente que circula a través de ambas resistencias es la misma, por tanto, si aplicamos $V = IR$:

$$\varepsilon = IR + Ir = I(R + r)$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Recordemos que el voltímetro de la Figura 5.64 *no* mide la fem de la pila, sino la d.p. entre bornes de la pila, que equivale a la d.p. útil suministrada al circuito.

Si la intensidad de corriente, I, que circula por el circuito es cero, los «voltios perdidos» (Ir) son también cero, y entonces la fem es igual a la d.p. entre bornes. Como consecuencia, se puede medir eficazmente la fem de una pila conectándola a un voltímetro de alta resistencia (cuando la pila no está conectada a nada más). (Como la resistencia del voltímetro es muy elevada, se puede considerar que la intensidad de corriente que circula a través del voltímetro y de la batería es despreciable.)

Ejemplo resuelto

19 **a** La pila representada en la Figura 5.64 tiene una fem de 1,5 V y una resistencia interna de 0,90 Ω. Calcula la intensidad de corriente del circuito si el resistor tiene un valor de 5,0 Ω.

b ¿Cuál es la d.p. a través del circuito?

a $\mathcal{E} = I(R + r)$

$1{,}5 = I(5{,}0 + 0{,}90)$

$I = \frac{1{,}5}{5{,}90} = 0{,}25\,\text{A}$

b $V = IR$

$V = 0{,}25 \times 5{,}0 = 1{,}3\,\text{V}$

La lectura del voltímetro es 1,3 V, pero la fem de la pila es 1,5 V, por tanto se han «perdido» 0,2 V a causa de la resistencia interna. Los voltios perdidos no se pueden medir directamente con el voltímetro, pero sí se pueden calcular a partir de Ir. Esta expresión nos indica que el valor de los voltios perdidos aumenta cuando la intensidad de corriente, I, que circula por la pila es elevada. Si la fuente de alimentación tiene una resistencia interna significativa, la d.p. útil suministrada al circuito disminuye de forma importante cuando circula una intensidad de corriente elevada.



Para determinar experimentalmente la resistencia interna, podemos utilizar el mismo circuito de la Figura 5.64 añadiéndole un amperímetro para medir la intensidad de corriente, I, a través de un resistor de resistencia conocida, R. Se puede utilizar ecuación $\mathcal{E} = IR + Ir = I(R + r)$ para calcular r si previamente se ha medido $\mathcal{E}$ en un experimento aparte. Otro método mejor consiste en utilizar un resistor variable en lugar de R y medir las intensidades de corriente para diferentes valores del voltaje. La curva V–I corta con uno de los ejes en un punto cuyo valor corresponde al de la fem y su pendiente equivale a la resistencia interna.

Se pueden conectar pilas similares en serie o en paralelo para ensamblar una batería. Si se conectan en serie, las d.p. y las resistencias internas simplemente se suman. Si se conectan en paralelo, la d.p. suministrada es la misma que la de una pila por separado, y la resistencia interna total se puede calcular mediante la fórmula para las resistencias en paralelo (página 225).

72 **a** Cuando se conecta una batería de fem 4,5 V y resistencia interna 1,1 Ω a un resistor, la intensidad de corriente que circula es de 0,68 A. ¿Cuál es el valor del resistor?

b Si se reemplaza el resistor anterior por otro que proporciona un valor doble de la resistencia, ¿cuál será la nueva intensidad de corriente?

c ¿Qué supuesto(s) has tenido en cuenta?

73 Cuando se conecta una pila de resistencia interna 0,24 Ω a una lámpara, la intensidad de corriente es 0,72 A y la d.p. a través de la lámpara es 2,8 V.

a Calcula la resistencia de la lámpara.

b ¿Cuál es la fem de la pila?

c Calcula la tasa de energía transferida (potencia) en:

i la lámpara

ii la pila.

74 Un voltímetro de alta resistencia indica un voltaje de 12,5 V cuando se conecta a los bornes de una batería que no está suministrando corriente a un circuito. Cuando se conecta la batería a una lámpara, circula una corriente de 2,5 A y la lectura del voltímetro desciende hasta 11,8 V.

a ¿Cuál es el valor de la fem de la batería?

b Calcula la resistencia interna de la batería.

c ¿Qué resistencia tiene la lámpara?

75 Ponemos en marcha el motor de un vehículo, de noche y con los faros encendidos. La puesta en marcha del motor requiere una intensidad de corriente elevada generada en una batería de 12 V y la iluminación de los faros se vuelve momentáneamente más tenue.

a ¿Por qué se necesita una intensidad de corriente elevada?

b Sugiere por qué la iluminación de los faros se vuelve más tenue.

76 La conexión por error de un cable entre los bornes de una batería o de una fuente de alimentación es un ejemplo de «cortocircuito».

a Calcula la intensidad de corriente que circula por una batería de fem 12,0 V y resistencia interna 0,25 Ω si se «cortocircuita» accidentalmente.

b ¿Qué supuestos has tenido en cuenta?

c Calcula la potencia transferida en la batería.

d Sugiere qué le sucede a la batería.

77 Explica por qué no se puede medir la resistencia interna de una batería del mismo modo que la resistencia de un resistor en un circuito.

78 Se conectan tres pilas de 1,5 V (cada una con una resistencia interna de 1,0 Ω) para ensamblar una batería. Determina la fem y la resistencia interna de la batería si las pilas están conectadas:
a en serie
b en paralelo.

79 **a** Dibuja un circuito que permita obtener un conjunto de lecturas diferencia de potencial-intensidad de corriente para una batería conectada a una resistencia variable.
b Explica por qué la pendiente de la curva *V–I* equivale a la resistencia interna y la intersección con el eje equivale a la fem.
c Explica por qué el uso de una gráfica proporciona una determinación más fiable de la resistencia interna que un cálculo basado en un único par de medidas.

80 Sugiere motivos por los que el uso de las pilas primarias ha ido en descenso a lo largo de los últimos años.

Aplicaciones

Pilas eléctricas: escoger una batería

Cuando elegimos una batería con un objetivo determinado, debemos tener en cuenta diversas cuestiones, no solo su fem. Es importante considerar:

- la resistencia interna
- la d.p. entre bornes cuando se usa normalmente (y su variación con el tiempo)
- el tamaño
- la energía total almacenada
- si se trata de una pila primaria o una pila recargable
- las características de recarga (si es una pila recargable)
- si su fabricación y sus residuos ocasionan una contaminación importante

Cuando sustituimos una batería de un aparato eléctrico o electrónico, normalmente no podemos elegir el tipo de batería que vamos a utilizar porque esta decisión ya se tomó durante el proceso de diseño. En la pregunta 81 (página 241) se muestra por qué es importante la resistencia interna de la pila (y su comparación con el resto del circuito).

El espectacular aumento del uso mundial de baterías de alta tecnología tiene importantes implicaciones tanto por lo que respecta a su suministro como al tratamiento de sus residuos. La distribución, la accesibilidad y el coste de los materiales que se emplean en la fabricación de baterías pueden convertirse en un tema cada vez más importante en el futuro. Las sustancias químicas que se emplean en las baterías pueden llegar a comportar un grave problema de contaminación si los residuos que producen no se tratan adecuadamente.

Los científicos insisten en estudiar cómo aumentar la cantidad de energía almacenada por gramo en una batería, y esta tarea requiere una colaboración estrecha con los químicos. Se trata de un ámbito prioritario de investigación tecnológica con aplicaciones de amplio alcance en las comunicaciones móviles, las fuentes de alimentación de emergencia, el transporte accionado por baterías y muchos otros usos.



Figura 5.65
Una bicicleta eléctrica en China



Figura 5.66
Una batería de teléfono móvil

A la cantidad de energía almacenada en una batería se le suele otorgar la unidad *amperio hora*, Ah (o vatio hora, Wh) en lugar del julio. Por ejemplo, una batería especificada con 10 Ah debe poder suministrar 1 A durante 10 h o bien 0,01 A durante 1000 h. Si se trata de una batería de 12 V la energía total nominal almacenada es $12 \times 10 \times 3600 = 4{,}3 \times 10^5$ J.

Una batería convencional para teléfono móvil (Figura 5.66) está diseñada con *iones de litio* y puede estar especificada con 3,8 V, 8 W h. En cada gramo de sustancias químicas de la batería se puede almacenar aproximadamente 1 kJ.

1 Si duplicamos el tamaño de una batería para teléfono móvil, ¿duplicaremos la energía almacenada y el tiempo transcurrido entre recargas? Si la respuesta es sí, argumenta por qué no lo hacen así los fabricantes.

Naturaleza de la ciencia

Los «avances» científicos comportan a veces riesgos inesperados a largo plazo

La investigación destinada a perfeccionar el diseño de las baterías parece que nos beneficia a todos, pero, como suele ocurrir, también hay aspectos negativos a tener en cuenta: la contaminación y el agotamiento de recursos, por ejemplo. Puede que *en la actualidad* seamos conscientes de las desventajas de un cambio tecnológico, pero hace unos años mucha gente no era capaz de prever las consecuencias del perfeccionamiento del diseño de las baterías (en particular respecto al rápido aumento de su uso). Tal vez se deberían haber previsto las consecuencias pero aun en este caso, ¿hubiera sido distinta la investigación en este ámbito?

Los avances científicos y tecnológicos han ocasionado cambios verdaderamente espectaculares en los estilos y condiciones de vida (incluyendo el ámbito sanitario y el de la recogida de residuos) para prácticamente todos los habitantes del planeta con memoria viva. No cabe la menor duda de que esta asombrosa velocidad de «progreso» va a continuar en aumento. Sin embargo, en todo desarrollo tecnológico hay siempre consecuencias predecibles y consecuencias inesperadas.

Curva característica de descarga de una batería

Hemos visto que la d.p. terminal entre bornes que suministra una batería a un circuito depende no solo de su fem sino también de la resistencia del circuito al que está conectada y de la propia resistencia interna de la batería. Sin embargo, otra de las características importantes de una batería es la variación temporal de la d.p. entre bornes (y la intensidad de corriente) suministrada a un mismo circuito: es la denominada **curva característica de descarga**. Esta curva se puede estudiar mediante sensores de voltaje e intensidad de corriente conectados a un registrador de datos, con el objeto de tomar medidas a intervalos regulares a lo largo de varias horas o días. La *curva característica* de carga de una pila recargable se puede estudiar de manera análoga.



En teoría el voltaje entre bornes suministrado por una batería debería mantenerse constante durante el máximo periodo de tiempo posible y después, cuando la energía almacenada ya ha sido transferida, debería descender rápidamente hasta el valor

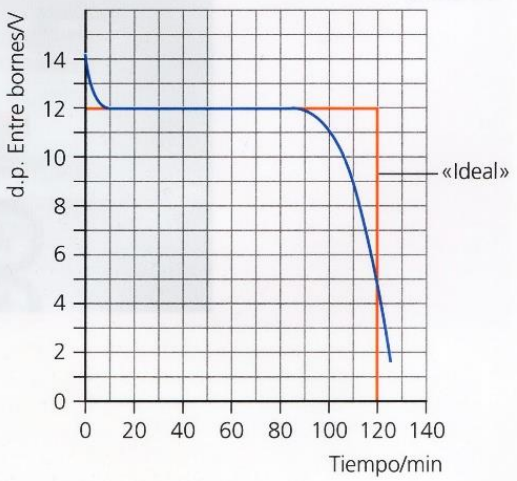
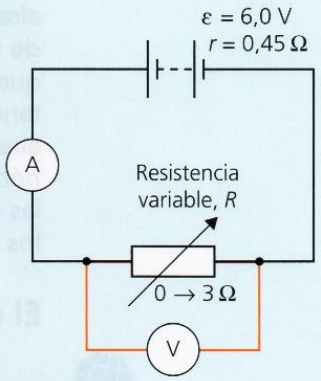


Figura 5.67
Curva característica de descarga de una batería

cero. De esta manera se suministra la menor energía posible a voltaje reducido, que probablemente sería demasiado bajo para el correcto funcionamiento del aparato que está siendo alimentado. En la Figura 5.67 se representa una curva característica de descarga típica. La d.p. inicial cae rápidamente hasta el voltaje normal de funcionamiento y, en este ejemplo, cabe esperar que la d.p. entre bornes se mantenga constante en el valor 12 V durante dos horas.

81 La batería de la figura 5.68 tiene una fem de 6,0 V y una resistencia interna de 0,45 Ω. El resistor variable, *R*, puede tomar cualquier valor ente 0 Ω y 3 Ω.

- **a** Diseña una hoja de cálculo para calcular la intensidad de corriente del circuito para un intervalo conveniente de valores de *R*.
- **b** Añade columnas para calcular la d.p. a través de *R* y la potencia generada en el resistor.
- **c** Representa gráficamente la variación de la potencia respecto al valor de *R*.
- **d** Explica por qué la potencia es baja tanto para valores altos de *R* como para valores bajos de *R*.
- **e** ¿En qué condiciones se obtiene la máxima potencia de la batería?



■ **Figura 5.68**

82 Uno de los principales atractivos de los coches eléctricos es que no contaminan, aunque la energía almacenada en sus baterías debe ser transferida desde algún otro lugar. Se está investigando mucho en el perfeccionamiento de la tecnología de las baterías para los coches eléctricos, con el objetivo de que puedan suministrar la energía necesaria para recorrer largas distancias y se puedan recargar más rápidamente. Consulta en Internet cuáles son los últimos avances en este ámbito.

83 **a** ¿Qué contaminantes importantes del agua y del suelo están presentes en las baterías usadas?
b ¿Se pueden reciclar los componentes de una batería usada?
c ¿Cómo se tratan los residuos correspondientes a las baterías usadas en tu comunidad?

84 Investiga el origen de los materiales que se utilizan para la fabricación de baterías de alta tecnología de última generación.

85 **a** Estima la energía total almacenada en una batería convencional de linterna teniendo en cuenta la potencia de la lámpara y el número de minutos que puede funcionar.
b Calcula la cantidad aproximada de energía almacenada en cada gramo de las sustancias químicas usadas en su fabricación.
c Compara tu respuesta con la cantidad de energía almacenada en:
i 1 g de chocolate
ii 1 g de gasolina (utiliza Internet).

86 Considera la Figura 5.67.
a ¿Durante cuánto tiempo puede funcionar un aparato accionado por esta batería si requiere entre 10 y 14 V?
b Estima la energía total transferida por la batería si suministra una intensidad de corriente constante de 0,46 A durante este periodo de tiempo.
c Estima la cantidad de energía que todavía queda almacenada en la batería después de que la d.p descienda por debajo de 10 V.

87 Esboza una gráfica voltaje-tiempo que sugiera la posible variación de la d.p. entre bornes de una pila recargable durante el proceso de recarga.

Enlace con la teoría del conocimiento

Responsabilidad científica

La sociedad contempla el almacenamiento de energía en baterías como algo provechoso a pesar de las posibles connotaciones medioambientales que rodean al tratamiento de sus residuos. ¿Debe responsabilizarse moralmente a los científicos por las consecuencias a largo plazo de sus inventos y descubrimientos?

La mayoría de los avances científicos y tecnológicos, si no todos, presentan algunos efectos secundarios indeseados y/o inesperados. Los más habituales son los relativos a la contaminación, la amenaza del mal uso de las nuevas tecnologías o las implicaciones para un mundo superpoblado. O puede ocurrir que una nueva tecnología traiga cambios espectaculares en el funcionamiento de las sociedades o las culturas, unos cambios que pueden comportar tanto beneficios como desventajas que, en muchas ocasiones, son discutibles.

¿Se debería hacer un mayor esfuerzo para anticipar los posibles efectos negativos de la investigación y del desarrollo científico? Tal vez es poco realista plantear esta pregunta porque muy pocas veces se puede predecir con éxito el futuro de algo, especialmente las consecuencias de una investigación que todavía está en proceso. Sin embargo, la mayoría de la gente está de acuerdo en que existen algunos ámbitos extremos en los que la investigación no se debería permitir nunca, como el caso de las bombas nucleares, por ejemplo. Es importante reconocer que una característica fundamental de gran parte de la investigación científica es que incluye el estudio de lo *desconocido*.

Si la «sociedad» decide que desea controlar un ámbito determinado de la investigación científica y tecnológica porque se considera que las posibles consecuencias negativas superan a los posibles beneficios, ¿quién toma estas decisiones y quién monitoriza y controla la investigación (especialmente en este mundo moderno globalizado)? ¿Es razonable esperar que los científicos sean responsables de sus propios descubrimientos e inventos?

5.4 Efectos magnéticos de las corrientes eléctricas

El efecto al que los científicos denominan magnetismo surge cuando una carga se desplaza cerca de otra carga en movimiento

Campos magnéticos

Los campos gravitatorios se generan alrededor de las masas y los campos eléctricos lo hacen alrededor de las cargas, pero, ¿qué genera un **campo magnético**? La respuesta «los imanes» puede ser válida, pero el tipo de **imanes** «**permanentes**» que nos resultan familiares (por ejemplo, los que sirven para sujetar notas sobre el frigorífico) representan solo un pequeño ejemplo sin importancia de los efectos magnéticos. *Todas* las corrientes eléctricas generan campos magnéticos a su alrededor y resulta difícil separar los términos electricidad y magnetismo. Los *efectos electromagnéticos* dominan nuestras vidas y son esenciales para el funcionamiento de cosas tan diversas como las centrales eléctricas, los trenes, los coches, los aviones, los televisores, los secadores de pelo y los ordenadores.

El campo magnético terrestre

Los materiales magnéticos se conocen desde hace miles de años, mucho antes de que se comprendieran verdaderamente. Las primeras civilizaciones ya sabían que un fragmento de material magnético que se puede desplazar libremente siempre gira hasta que se orienta aproximadamente en dirección norte–sur. El extremo que apunta hacia el norte se denomina **polo norte** y el otro extremo se denomina **polo sur**. Cuando un imán se utiliza para determinar la dirección se denomina **brújula** y, durante siglos, las brújulas han ayudado a las personas a orientarse. En los últimos años se han popularizado mucho los *magnetómetros* (aparatos que detectan la intensidad de un campo magnético), especialmente porque se pueden fabricar con tamaños muy pequeños y se pueden incorporar a dispositivos como los teléfonos móviles.

Las barras imantadas más simples tienen un único polo en cada extremo y se denominan **dipolos** magnéticos. No es posible obtener un imán con un único polo, y si cortamos por la mitad un dipolo magnético el resultado son dos dipolos magnéticos más pequeños y más débiles. Los imanes se pueden diseñar de manera que tengan formas complejas y múltiples polos. Cuando se sitúan dos dipolos magnéticos cerca uno de otro, enseguida queda claro que los polos opuestos se atraen y los polos iguales se repelen. Si al menos uno de los dos dipolos se puede mover libremente, enseguida se alinea con el otro según la regla descrita anteriormente. Este fenómeno nos ayuda a explicar el funcionamiento de una brújula: la propia Tierra se comporta como si fuera una gran barra imantada, y el pequeño imán de la brújula, que se puede mover libremente, gira hasta orientarse con el campo magnético terrestre.

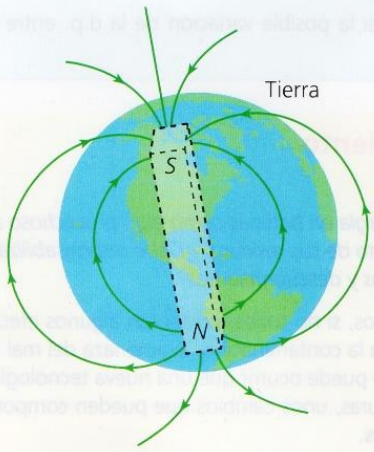


Figura 5.69
Campo magnético terrestre

Los términos *polo norte* y *polo sur* se siguen utilizando para describir los extremos de los imanes, aunque se pueden confundir fácilmente con los polos geográficos terrestres. Por definición, el extremo al que denominamos polo norte de un imán es atraído por el polo norte geográfico de la Tierra. Esto significa que el campo magnético terrestre tiene un polo sur *magnético* en el polo norte geográfico y un polo norte *magnético* en el polo sur geográfico. En la Figura 5.69 se representa el campo magnético terrestre mediante líneas de campo, que se estudiarán con mayor profundidad en el apartado siguiente.

Los polos geográficos terrestres están ubicados en el punto donde el eje de rotación corta a la superficie, pero los polos del campo magnético terrestre no están ni en el mismo lugar, ni sobre la superficie, y además rotan lentamente. Actualmente la separación entre el polo norte geográfico y el polo norte magnético es de unos 800 km. La navegación con brújula en distancias largas puede ser problemática si el viajero no es consciente de esta separación, especialmente cuando está cerca de los polos. Como alternativa se puede utilizar una brújula giroscópica (como hacen los grandes buques), que localiza el verda-

dero norte en función de la rotación de la Tierra (con la ventaja añadida de que no se ve influenciada por el acero del buque). También se puede utilizar el sistema de navegación GPS.

El campo magnético terrestre está generado por las corrientes eléctricas que circulan por el núcleo externo líquido, y se cree que su polaridad se invierte (el norte se convierte en sur y el sur en norte) en promedio una vez cada 300 000 años, por motivos que todavía no se conocen del todo. La última inversión de polaridad se supone que tuvo lugar hace unos 800 000 años.

88 El campo magnético terrestre se extiende muy por encima de la superficie de la Tierra. Busca información sobre la magnetosfera terrestre y averigua cómo protege a la Tierra del «viento solar».

89 Se suele decir que algunos pájaros, peces, mamíferos marinos, e incluso bacterias pueden navegar gracias a su capacidad para detectar (de algún modo) el campo magnético terrestre. Consulta Internet para averiguar si se trata de un hecho científico, una teoría o un mito.

90 ¿Utilizan las aeronaves modernas brújulas, brújulas giroscópicas, magnetómetros, radares, aerofaros, GPS o algún otro método de navegación? Busca información sobre los tipos de sistemas de navegación que se utilizan en los aviones modernos.

Diagramas del campo magnético

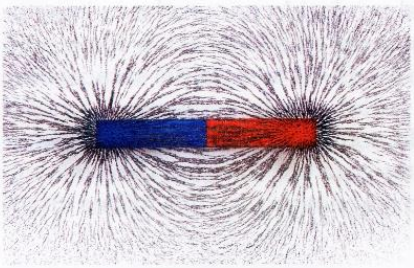


Figura 5.70
Las limaduras de hierro se pueden utilizar para visualizar el campo magnético alrededor de una barra imantada

Al inicio de este capítulo vimos que cualquier carga (en movimiento o estacionaria) tiene un campo eléctrico a su alrededor. Los campos magnéticos se generan alrededor de cargas *en movimiento*.

Como las corrientes eléctricas son flujos de cargas en movimiento, *todas* las corrientes eléctricas tienen campos magnéticos a su alrededor.

El campo alrededor de un imán permanente (véase Figura 5.70) tiene su origen en el movimiento de electrones en determinados átomos (como el hierro, que se describe como **ferroso**). En la mayoría de materiales no ferrosos estos efectos magnéticos a pequeña escala se cancelan entre sí.

Los campos magnéticos se pueden representar sobre papel o sobre una pantalla mediante las **líneas de campo magnéticas**. (Los campos eléctricos y los campos gravitatorios también se pueden representar mediante líneas de campo). La dirección y el sentido de un campo magnético se toman por convenio como la dirección y el sentido hacia los que apunta una brújula: desde el norte *magnético* hacia el sur *magnético*.

Los campos son más intensos cuando las líneas de campo están más juntas, pero nunca se pueden cruzar porque eso significaría que el campo va dirigido en dos direcciones distintas en el mismo lugar.

Los diagramas del campo magnético alrededor de imanes permanentes o corrientes se pueden estudiar experimentalmente en *dos* dimensiones mediante pequeñas brújulas que llevan incorporada una punta trazadora, o mediante limaduras de hierro (como las de la Figura 5.70), que giran de forma individual hasta que se orientan paralelamente al campo magnético en ese punto. Los campos magnéticos, sin embargo, se propagan en *tres* dimensiones, de modo que las simulaciones por ordenador pueden ayudar a los alumnos a visualizarlos de una forma más realista.

En este curso vamos a hablar de los campos magnéticos alrededor de las corrientes en alambres largos y rectos, alrededor de las corrientes en los solenoides y alrededor de los dipolos de una barra de imán, así como de los fuertes y útiles campos magnéticos uniformes producidos entre los polos magnéticos opuestos muy cercanos.

Campo magnético generado por una corriente que circula por una varilla metálica larga

En la Figura 5.71a se representa el campo generado por una corriente continua que circula por una varilla metálica larga. En este diagrama sabemos que la corriente circula perpendicularmente al plano del papel gracias a la cruz que hay en el centro. El campo es circular alrededor de la varilla y se hace más débil a medida que nos alejamos de esta, como indica la distancia cada vez mayor entre las líneas de campo. (La intensidad del campo es inversamente proporcional a la distancia desde la varilla). En el diagrama se representa también el sentido de las líneas de campo, que se puede predecir mediante la **regla del sacacorchos con la mano derecha**: si el pulgar apunta hacia el sentido convencional de la circulación de la corriente, los dedos indican el sentido del campo magnético.

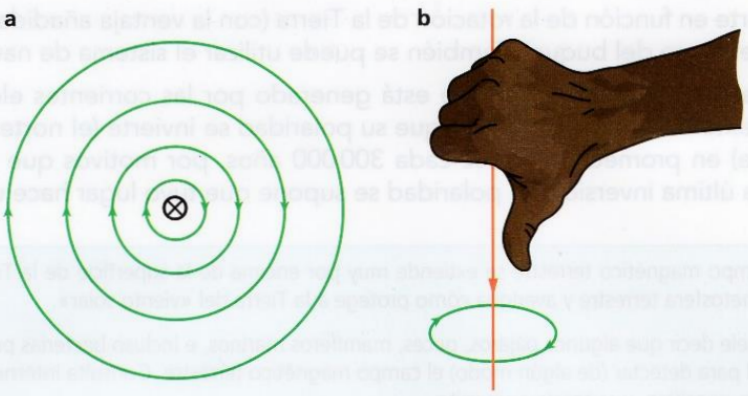


Figura 5.71
a El campo magnético generado por una corriente que circula por una varilla metálica larga es perpendicular al plano del papel; b uso de la regla del sacacorchos con la mano derecha para predecir el sentido del campo

Campo magnético generado por la corriente que circula por un solenoide

Un **solenoide** es un hilo metálico aislado enrollado en espiral de manera regular para que las vueltas no se solapen entre sí; el resultado es una bobina mucho más larga que ancha. Los solenoides son muy útiles porque generan campos magnéticos uniformes muy intensos. En la Figura 5.72 se representa un solenoide y las líneas paralelas del campo magnético uniforme que se genera en su interior. El diagrama del campo total tiene una forma similar al producido por una barra imantada permanente simple. Uno de los extremos del solenoide actúa como polo norte y el otro como polo sur (confirmado mediante la regla del sacacorchos con la mano derecha). Si invertimos el sentido de la corriente, los polos también se invierten, fenómeno conocido como inversión de la **polaridad** del campo magnético. Cuantas más vueltas para una longitud determinada de hilo metálico, más intenso es el campo magnético para una misma intensidad de corriente.

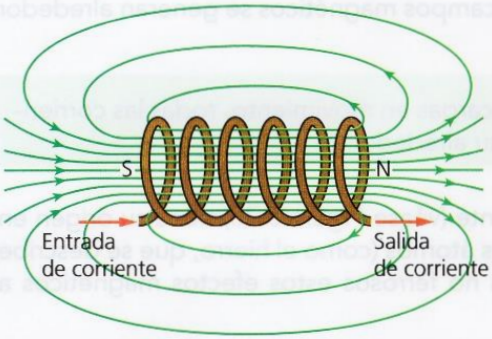


Figura 5.72
Campo magnético generado por la corriente que circula por un solenoide

Los distintos materiales tienen diferentes propiedades magnéticas. La **permeabilidad** magnética es una medida de la capacidad de un medio para transferir un campo magnético, y se puede comparar a la **permitividad** de los campos eléctricos. La permeabilidad magnética del vacío se representa con el símbolo μ_0 y su valor figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Otros materiales poseen permeabilidades más elevadas. Si enrollamos un solenoide o una bobina de hilo metálico sobre un núcleo de un material con una permeabilidad muy elevada (por ejemplo hierro), el campo generado puede ser mucho más intenso que sin el núcleo. Así se pueden fabricar los electroimanes (Figura 5.73), que generan campos muy intensos aunque regulables. El material magnético que se utiliza como núcleo debe ganar y perder sus propiedades magnéticas rápidamente, por ese motivo se emplea el hierro «dulce» como núcleo de la mayoría de aparatos electromagnéticos, como los transformadores y los electromotores.

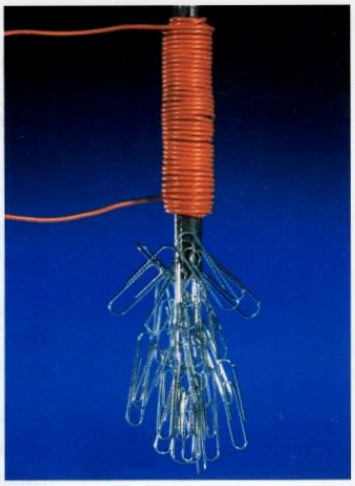


Figura 5.73
Estudio de un electroimán en un laboratorio

Las propiedades de los electroimanes son un tema interesante para investigar en el laboratorio, no solo porque hay tantas variables en juego, sino también porque es necesario diseñar un método de medida muy preciso de la intensidad del campo magnético.

Campos magnéticos generados por imanes permanentes

En la Figura 5.74 se representa el campo magnético alrededor de un dipolo magnético simple. La brújula con una punta trazadora indica la dirección del campo en un punto. Debe compararse con la Figura 5.70.

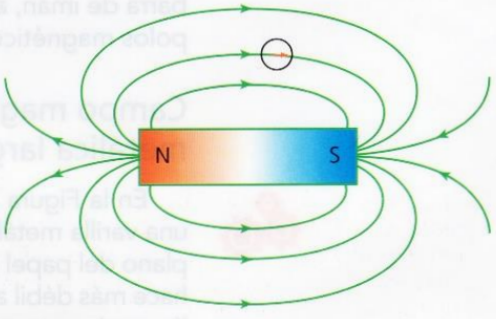


Figura 5.74
Campo magnético alrededor de un dipolo magnético simple

En la Figura 5.75 se indica la forma, la dirección y el sentido de los campos magnéticos entre los polos de dos imanes situados uno junto al otro.

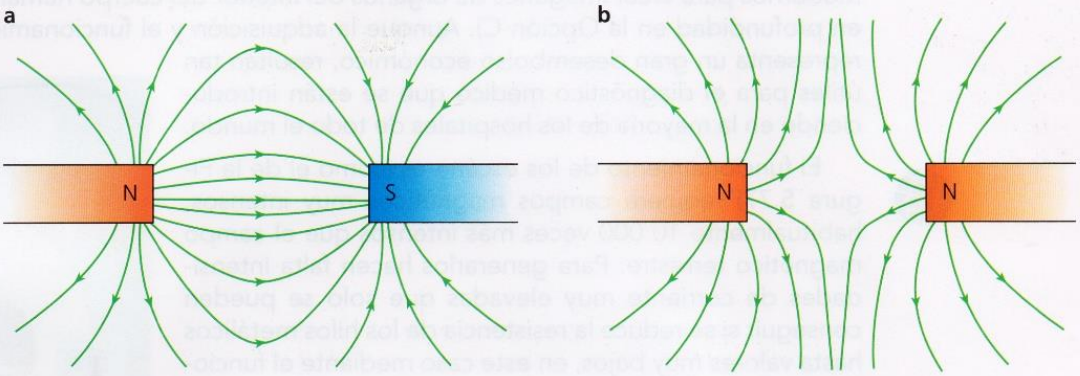


Figura 5.75
Campos magnéticos entre imanes: **a** *entre polos opuestos y* **b** *entre polos iguales*

También puede ser práctico generar un campo magnético intenso y uniforme con un electroimán, tal como se representa en la Figura 5.76. Este tipo de campos magnéticos, como los que se generan en el interior de un solenoide, tienen muchas aplicaciones en la ciencia y en la tecnología, entre las que se encuentran los escáneres médicos (véase Figura 5.77).

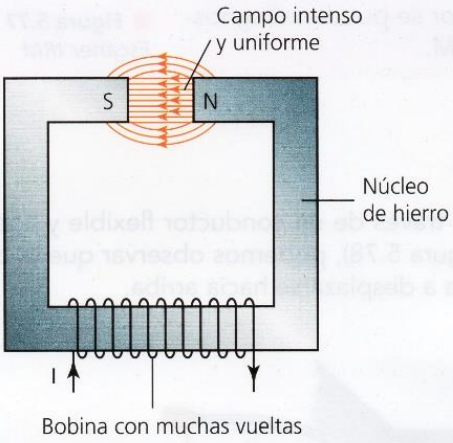


Figura 5.76
Uso de un electroimán para generar un campo magnético intenso y uniforme

Naturaleza de la ciencia

Los modelos visuales pueden facilitar la comprensión

Gran parte de lo que estudia la Física se refiere a cosas que no podemos ver. Para facilitar su comprensión, los científicos desarrollan *modelos* de diversos tipos para representar, de algún modo, las ideas que desean comunicar. Estos modelos pueden consistir en descripciones escritas simplificadas, dibujos en dos dimensiones, estructuras en tres dimensiones y ecuaciones matemáticas. Los campos magnéticos, eléctricos y gravitatorios ocupan el espacio que nos rodea, pero no podemos verlos. Esto hace que sean especialmente difíciles de comprender, pero el uso de líneas de campo para representarlos gráficamente es de gran ayuda para su estudio y para la comunicación de los conceptos. Debe quedar claro que las líneas de campo no constituyen una realidad física, pero la visualización de los campos es fundamental para que la mente humana los comprenda.

Enlace con la teoría del conocimiento

La creación de mapas es un medio habitual para simplificar los modelos de información

Los diagramas de campos permiten la visualización de un fenómeno complejo, lo que resulta esencial para comprenderlo. ¿Por qué podría ser útil contemplar el conocimiento de una forma similar, utilizando la metáfora del conocimiento como un mapa, es decir, una representación simplificada de la realidad?

El uso de líneas y de diagramas para representar campos está ampliamente aceptado por la comunidad científica como, posiblemente, la única manera de presentar a la mente humana estos conceptos complejos de una forma simple, aunque nadie piense que son «reales». Se podría argumentar que una simplificación de este tipo limita de algún modo nuestra comprensión, o nuestra imaginación, sobre el tema porque canaliza nuestros pensamientos en determinadas direcciones prescritas. La creación de **mapas** (representaciones gráficas) en cualquier área del conocimiento es una simplificación especialmente atractiva para facilitar nuestra comprensión, pero, como toda simplificación, presenta limitaciones.

Aplicaciones

Campos magnéticos utilizados en los escáneres médicos

La **obtención de imágenes mediante resonancia magnética** (IRM) se utiliza en los hospitales modernos para crear imágenes de órganos del interior del cuerpo humano. (Este tema se estudia en profundidad en la Opción C). Aunque la adquisición y el funcionamiento de estos escáneres representa un gran desembolso económico, resultan tan útiles para el diagnóstico médico que se están introduciendo en la mayoría de los hospitales de todo el mundo.

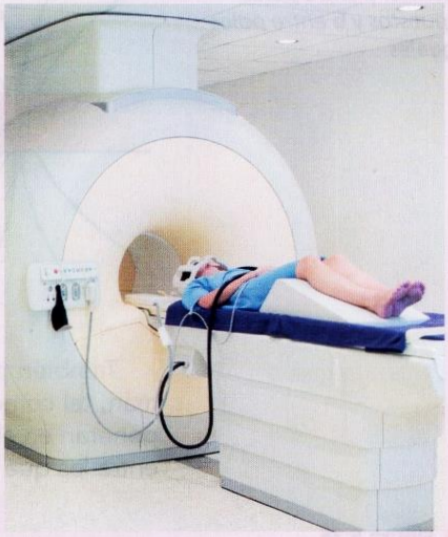


Figura 5.77
Escáner IRM

El funcionamiento de los escáneres (como el de la Figura 5.77) requiere campos magnéticos muy intensos, habitualmente 10 000 veces más intensos que el campo magnético terrestre. Para generarlos hacen falta intensidades de corriente muy elevadas que solo se pueden conseguir si se reduce la resistencia de los hilos metálicos hasta valores muy bajos, en este caso mediante el funcionamiento a temperaturas extremadamente bajas. Se utiliza helio líquido a una temperatura de unos 3 K para enrollar los electroimanes, de manera que los hilos metálicos se vuelvan **superconductores** (cuya resistencia es prácticamente cero).

1 En la obtención de imágenes para el diagnóstico médico se emplean diversas técnicas. Averigua cuáles son las enfermedades que mejor se pueden diagnosticar mediante los escáneres IRM.

Fuerza magnética

Cuando circula una corriente a través de un conductor flexible y ligero sometido a un campo magnético intenso (como en la Figura 5.78), podemos observar que el conductor se desplaza. En este ejemplo, el aluminio comienza a desplazarse hacia arriba.

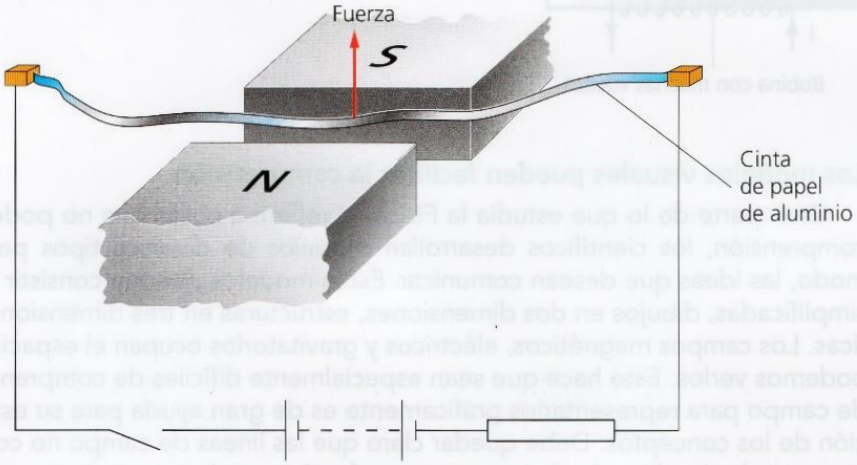


Figura 5.78
Experimento para observar la fuerza sobre la corriente que circula por una cinta de papel de aluminio

Para describir y explicar este importante fenómeno, además de muchos otros efectos electromagnéticos, necesitamos representar y comprender estas situaciones en tres dimensiones. En la Figura 5.79a se representa una situación análoga a la de la Figura 5.78: un hilo metálico que transporta una corriente eléctrica a través de un campo magnético. La corriente es perpendicular al campo magnético generado por los imanes permanentes. En la Figura 5.79b se representa la misma situación en forma de sección transversal, donde el hilo metálico se representa mediante el punto P, el campo magnético generado por los imanes en color verde y el generado por la corriente en color azul.

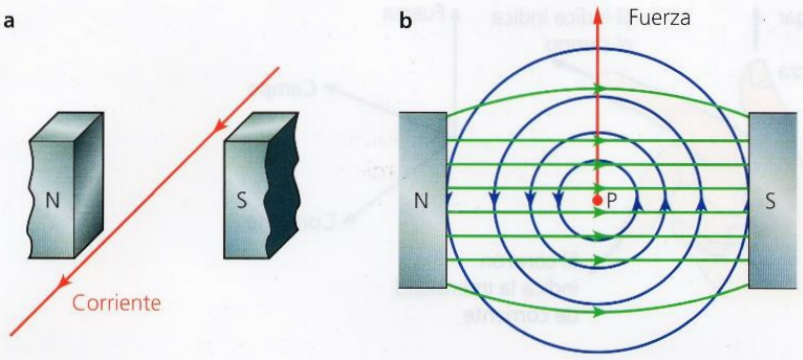


Figura 5.79
Comparación de las direcciones y sentidos de la corriente, el campo y la fuerza.

Los dos campos están en el mismo plano, por tanto es fácil considerar el campo combinado que producen. Por encima del hilo metálico ambos campos actúan en sentidos contrarios y su combinación produce un campo más débil. Por debajo del hilo metálico se combinan para generar un campo más intenso. La diferencia en la intensidad del campo magnético entre ambos lados del hilo metálico produce una fuerza sobre este que lo tira hacia arriba, y que incluso lo puede desplazar (si no está fijado en una posición determinada). Este importante y útil fenómeno se suele denominar **efecto motor** y constituye el principio básico de funcionamiento de los motores eléctricos.

Para que actúe una fuerza sobre un conductor con corriente eléctrica sometido a un campo magnético, la corriente debe circular *a través* del campo. Cuando la corriente circula en la misma dirección de las líneas de campo magnéticas de los imanes permanentes, los campos no interactúan y, por tanto, no se produce una fuerza. En la Figura 5.79 se representa la situación en la que la fuerza es máxima, porque el campo y la corriente son perpendiculares. Cuando el ángulo entre el campo y la corriente se reduce también se reduce la fuerza. Consideremos la Figura 5.80, en la que se representan tres hilos metálicos que transportan la misma intensidad de corriente en direcciones distintas bajo el mismo campo magnético uniforme.

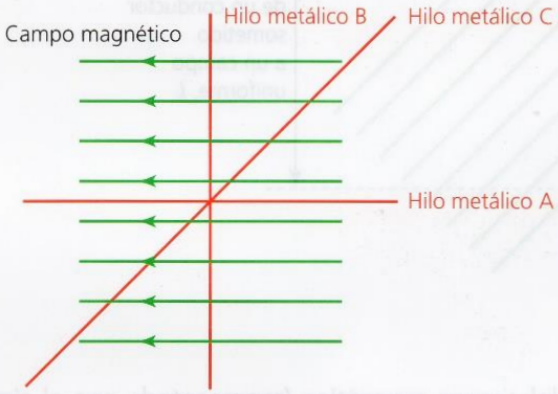


Figura 5.80
Variación de la fuerza con respecto al ángulo que forman la intensidad de corriente y el campo magnético: no habrá fuerza sobre el hilo metálico A y la máxima fuerza por unidad de longitud corresponderá al hilo metálico B. El hilo metálico C experimentará la acción de una fuerza, pero la fuerza por unidad de longitud será menor que en el caso del hilo metálico B

Dirección y sentido de la fuerza magnética sobre un conductor con corriente eléctrica sometido a un campo magnético

La dirección de la fuerza magnética es siempre perpendicular a la dirección de la intensidad de corriente y a la del campo magnético. En la Figura 5.80, las fuerzas sobre B y C van hacia dentro o hacia fuera del plano del papel, dependiendo del sentido de la intensidad de corriente. Podemos utilizar la **regla de la mano izquierda de Fleming** para predecir el sentido de la fuerza si la intensidad de corriente y el campo son perpendiculares. Esta regla se representa en la Figura 5.81. Recordemos que los campos magnéticos siempre van orientados desde el norte magnético hacia el sur magnético, y que el sentido positivo de la intensidad de corriente eléctrica se toma por convenio desde el borne positivo hacia el negativo.

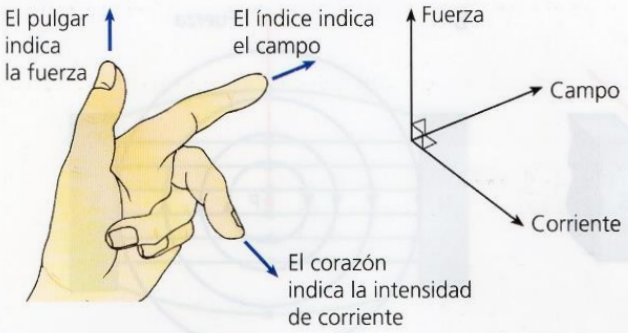


Figura 5.81
La regla de la mano izquierda de Fleming predice la dirección y el sentido de la fuerza

Intensidad del campo magnético

Sabemos que la intensidad del campo gravitatorio, g, equivale a la fuerza gravitatoria dividida por la masa, y que la intensidad del campo eléctrico, E, equivale a la fuerza eléctrica dividida por la carga. Parece coherente sugerir que la **intensidad del campo magnético** equivalga a la fuerza magnética dividida por la carga en movimiento (intensidad de corriente). Sin embargo, la magnitud de la fuerza magnética no depende solo de la intensidad de corriente, I, sino también de su orientación relativa respecto al campo, θ(véase la Figura 5.82).

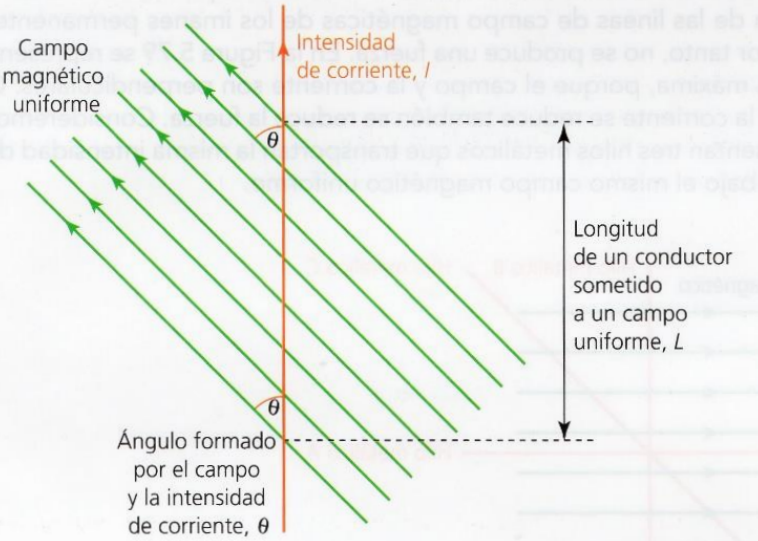


Figura 5.82
Una corriente de intensidad I circula a través de un campo magnético con el que forma un ángulo θ

Definimos la intensidad del campo magnético (representada con el símbolo B) de la manera siguiente:

$$B = \frac{F}{IL \operatorname{sen}\theta}$$

La intensidad del campo magnético se denomina habitualmente **densidad de flujo magnético** (el motivo se explicará en el Capítulo 10, para estudiantes de Nivel superior). Las unidades de la intensidad del campo magnético son los newton por amperio y metro, N A^{-1} m^{-1}. A diferencia del caso de los campos gravitatorios y eléctricos, a la unidad de la intensidad del campo magnético se le otorga también otro nombre: el **tesla**, T. (En honor al excéntrico físico Nikola Tesla, nacido en Croacia de padres serbios, y que llevó a cabo importantes estudios sobre electromagnetismo en Europa y posteriormente en Estados Unidos.)

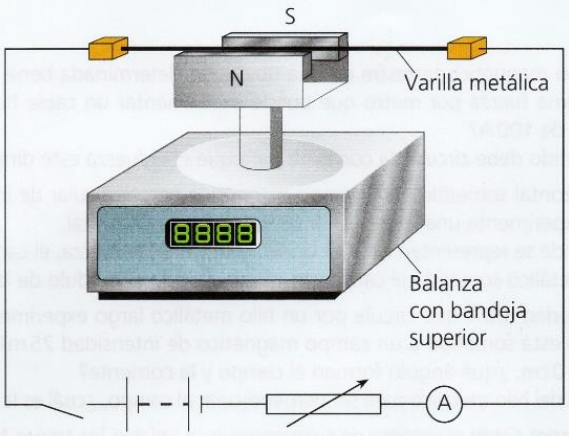
La ecuación anterior se suele escribir en la forma:

$$F = BIL \operatorname{sen}\theta$$

Esta ecuación, que figura en el *Apéndice de datos de Física*, indica que la fuerza que actúa sobre un conductor con corriente sometido a un campo magnético es igual a la magnitud de la intensidad de corriente multiplicada por la longitud del conductor, y por la componente del campo perpendicular a la corriente.

Ejemplo resuelto

20 En la Figura 5.83, una corriente de intensidad conocida circula a través de un campo magnético de baja intensidad.



■ **Figura 5.83** Determinación de la intensidad de un campo magnético

a ¿En qué sentido actúa la fuerza sobre la varilla metálica?
b ¿En qué sentido actúa la fuerza sobre la balanza?
c La balanza indica la presencia de una masa adicional de $4{,}2 \times 10^{-2}$ g cuando circula corriente. ¿De qué fuerza adicional hacia abajo se trata?
d Si la intensidad de la corriente es 1,64 A y la longitud de la varilla es 8,13 cm, ¿Cuál es la intensidad del campo magnético?

a La fuerza es hacia arriba (utilizando la regla de la mano izquierda).

b La fuerza es hacia abajo (utilizando la tercera ley de Newton).

c $P = mg = (4{,}2 \times 10^{-2} \times 10^{-3}) \times 9{,}81$

$P = 4{,}12 \times 10^{-4}$ N

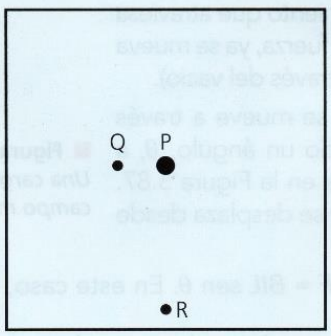
d Utilizando $F = BIL \operatorname{sen}\theta$, con $\operatorname{sen}\theta = 1$, obtenemos:

$4{,}12 \times 10^{-4} = B \times 1{,}64 \times 0{,}0813$

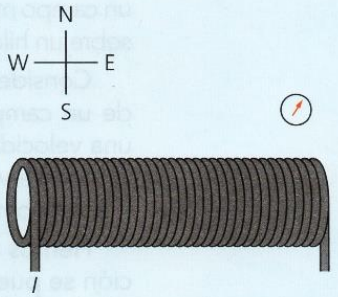
$B = 3{,}09 \times 10^{-3}$ T

91 Por el punto P de la Figura 5.84 circula una corriente de alta intensidad verticalmente hacia arriba, hacia fuera del plano del papel.
a ¿Qué dirección y sentido tiene el campo magnético (generado por esta corriente) en los puntos Q y R?
b ¿Qué intensidad tiene el campo en el punto Q comparada con la del punto R?

92 En la Figura 5.85 se representa una brújula situada cerca de un solenoide por el que pasa una corriente de baja intensidad *I*.
a Haz una copia del diagrama donde representes hacia dónde se orientaría la brújula si se duplicara la intensidad de corriente que circula por el solenoide.
b ¿Hacia dónde se orientaría la misma brújula si se invirtiera el sentido de la corriente?
c Sitúa la brújula en una posición del diagrama en la que esté orientada hacia el sur geográfico (con la corriente original).



■ **Figura 5.84**



■ **Figura 5.85**

93 Calcula la fuerza magnética por metro sobre un hilo metálico con corriente de intensidad 1,2 A y sometido a un campo magnético de 7,2 mT, si el ángulo entre el hilo metálico y el campo es:
a 30°
b 60°
c 90°
d 0°.

94 **a** La intensidad del campo magnético terrestre en una ubicación determinada tiene una componente horizontal de 24 μT. ¿Cuál es la máxima fuerza por metro que puede experimentar un cable horizontal por el que circula una intensidad de corriente de 100 A?
b ¿En qué dirección y sentido debe circular la corriente para que esta fuerza esté dirigida verticalmente hacia arriba?

95 Por un hilo metálico horizontal sometido a un campo magnético perpendicular de intensidad 0,36 T circula una corriente. El hilo metálico experimenta una fuerza de 0,18 N, también horizontal.
a Dibuja un diagrama donde se representen las direcciones relativas de la fuerza, el campo y la intensidad de corriente.
b Si la longitud de hilo metálico sometida al campo es 16 cm, calcula el módulo de la intensidad de corriente.

96 **a** Una corriente de intensidad 3,8 A que circula por un hilo metálico largo experimenta una fuerza de $5,7 \times 10^{-3}$ N cuando el hilo metálico está sometido a un campo magnético de intensidad 25 mT. Si la longitud de hilo metálico sometida al campo es 10 cm, ¿qué ángulo forman el campo y la corriente?
b Si se cambia la dirección del hilo metálico para ser perpendicular al campo, ¿cuál es la nueva fuerza sobre la corriente?

97 Busca información en Internet sobre el sistema de suspensión que utilizan los trenes Maglev.

Fuerzas entre las corrientes de hilos metálicos paralelos

Consideremos los dos hilos metálicos paralelos representados en la Figura 5.86. Si ambos hilos transportan corriente, la corriente que circula por uno de los hilos está sometida al campo magnético generado por la corriente que circula por el otro. Cada hilo experimenta una fuerza debida al otro hilo. Si ambas corrientes tienen el mismo sentido, según la regla de la mano izquierda ambas fuerzas serán de atracción entre los hilos, además de ser iguales y de sentido opuesto (recordemos la tercera ley de Newton). Si las corrientes tienen sentidos opuestos, los hilos se repelen.

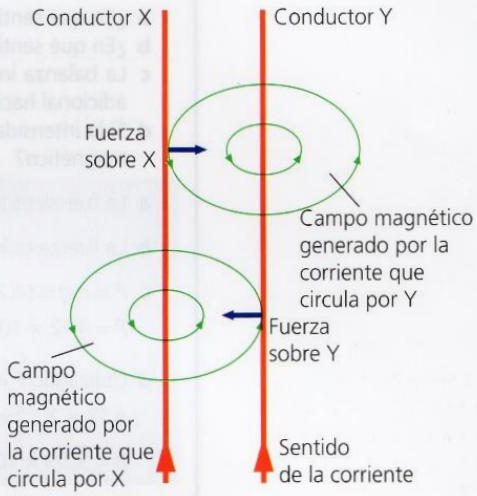


Figura 5.86
Fuerzas entre dos corrientes paralelas

Esta disposición se usa para definir la unidad de la intensidad de corriente en el SI, el amperio. Un amperio, 1 A, es la intensidad de corriente que circula a través de dos hilos paralelos rectos e infinitamente largos, que genera una fuerza de 2×10^{-7} N m^{-1} entre ellos si estos están separados una distancia de 1 m en el vacío.

Fuerza magnética sobre una carga individual en movimiento a través de un campo magnético

Debe quedar claro que las fuerzas de las que hemos hablado no actúan sobre los propios hilos metálicos sino sobre las *corrientes*. De hecho, la fuerza sobre una corriente es la suma de las fuerzas sobre las cargas individuales en movimiento. *Cualquier* carga en movimiento que atraviesa un campo magnético experimenta una fuerza, ya se mueva sobre un hilo metálico o libremente (a través del vacío).

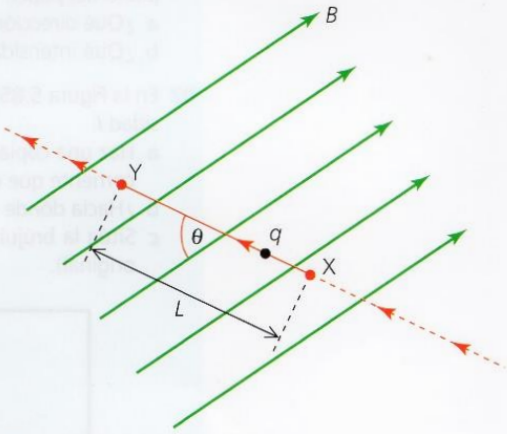


Figura 5.87
Una carga individual moviéndose a través de un campo magnético

Consideremos una carga, q, que se mueve a través de un campo magnético, B, formando un ángulo, θ, a una velocidad, v, tal como se muestra en la Figura 5.87. En un intervalo de tiempo t, la carga q se desplaza desde X a Y recorriendo una distancia L.

Hemos visto anteriormente que $F = BIL \operatorname{sen} \theta$. En este caso, $v = L/t$ y $I = q/t$, por tanto la ecuación se puede reescribir como:

$F = B(q/t)(vt) \operatorname{sen} \theta$

Eliminando t obtenemos:

$$F = qvB \operatorname{sen} \theta$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Con esta ecuación podemos calcular la fuerza magnética que actúa sobre cualquier partícula cargada que se mueve a través de un campo magnético uniforme. Observemos el hecho importante e interesante de que la fuerza es mayor cuanto más rápido se mueve la partícula. Sobre una carga que no está en movimiento (es decir, cuando $v = 0$) no actúa ninguna fuerza.

En un laboratorio escolar no es posible monitorizar el progreso de las partículas cargadas individuales, pero esta ecuación es útil cuando se estudian las propiedades de las partículas cargadas que provienen de un *haz* de partículas. Entre estos se encuentran los haces de electrones, protones, iones y ciertos tipos de radiaciones nucleares (partículas alfa y partículas beta). Estudiar la deflexión de los haces de partículas que atraviesan campos magnéticos (y/o campos eléctricos) permite determinar la carga y/o la masa de las partículas individuales, así como sus velocidades y energías.

Dirección y sentido de la fuerza magnética sobre una partícula que se mueve a través de un campo magnético

Cualquier partícula cargada que se mueve perpendicularmente a través de un campo magnético experimenta una fuerza que siempre es perpendicular a su velocidad instantánea. La dirección y el sentido de la fuerza se pueden predecir mediante la regla de la mano izquierda, recordando que el sentido de la corriente eléctrica es la del movimiento de las cargas positivas. (Esto significa que el sentido de la intensidad de corriente de los electrones es opuesto al de su velocidad.)

Para que exista un movimiento circular hace falta una fuerza perpendicular al movimiento. (Esta condición se explicará más adelante en el Capítulo 6.) Por tanto, cualquier partícula cargada que se mueva perpendicularmente a un campo magnético describirá un arco de circunferencia.

En la Figura 5.88 se muestran ejemplos de cargas que se mueven perpendicularmente a través de campos magnéticos intensos. En cada ejemplo, las velocidades y las energías cinéticas de las partículas no cambian como consecuencia de la fuerza magnética perpendicular. Observemos cómo se representa el sentido del campo magnético perpendicular al papel:

- una ⊙ indica que el campo está orientado hacia fuera del papel
- una × indica que el campo está orientado hacia dentro del papel.

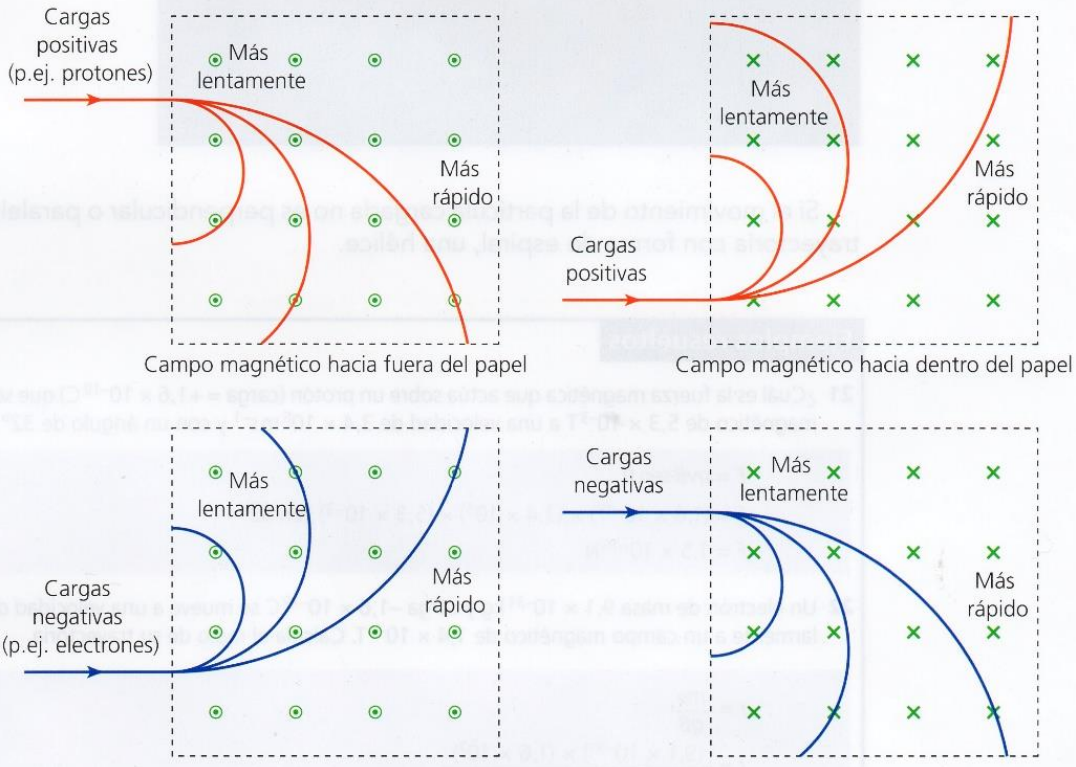


Figura 5.88
Trayectorias circulares de cargas que se mueven perpendicularmente a un campo magnético

La Figura 5.88 también muestra que cuanto más rápido se mueve la partícula, mayor es el radio de su trayectoria circular, aunque esté experimentando una fuerza magnética mayor. Esto se puede explicar igualando la ecuación para la fuerza magnética a la ecuación para la fuerza que produce un movimiento circular, $F = \frac{mv^2}{r}$ (véase Capítulo 6). Para una carga de masa, m, que se mueve describiendo una trayectoria circular de radio r:

$$F = qvB \text{ sen } \theta = \frac{mv^2}{r}$$

Recordemos que para un movimiento perpendicular al campo, sen $\theta = 1$, obtenemos:

$$qB = \frac{mv}{r}$$

$$r = \frac{mv}{qB}$$

Esta ecuación (que *no* figura en el *Apéndice de datos de Física* y que no es necesario que recuerdes), nos muestra que para una masa, carga y campo magnético determinados, el radio es proporcional a la velocidad de la carga. Una carga que está perdiendo energía cinética y velocidad (a causa de las colisiones con otras partículas) cae en espiral a medida que su radio disminuye.

También podemos observar que si la velocidad y la carga de las partículas permanecen constantes, su radio en un campo magnético determinado depende solo de su masa. Se puede obtener información sobre la masa y la velocidad de las partículas subatómicas mediante el análisis de sus trayectorias cuando se mueven a través de un campo magnético conocido (véase Figura 5.89).

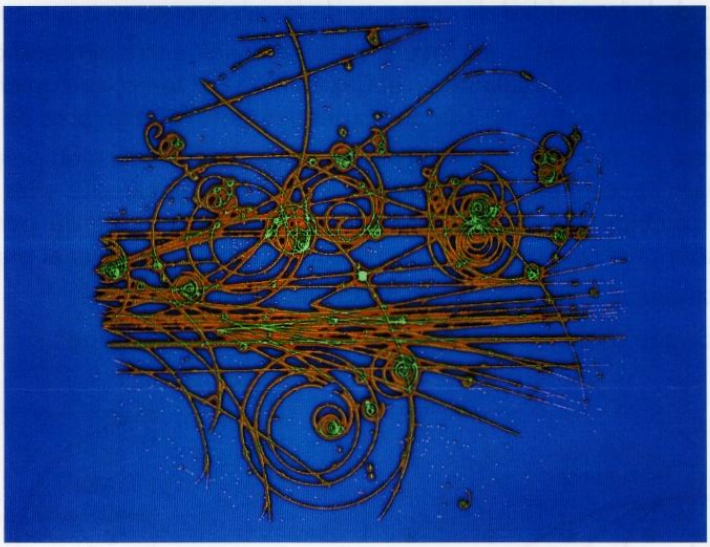


Figura 5.89
Trayectorias curvas de las partículas individuales en una cámara de burbujas usada en física nuclear

Si el movimiento de la partícula cargada no es perpendicular o paralelo al campo, describirá una trayectoria con forma de espiral, una hélice.

Ejemplos resueltos

21 ¿Cuál es la fuerza magnética que actúa sobre un protón (carga = $+1{,}6 \times 10^{-19}$ C) que se mueve a través de un campo magnético de $5{,}3 \times 10^{-3}$ T a una velocidad de $3{,}4 \times 10^{5}\,m\,s^{-1}$ y con un ángulo de 32° respecto al campo?

$$F = qvB \operatorname{sen}\theta$$
$$F = (1{,}6 \times 10^{-19}) \times (3{,}4 \times 10^{5}) \times (5{,}3 \times 10^{-3}) \operatorname{sen} 32°$$
$$F = 1{,}5 \times 10^{-16}\,N$$

22 Un electrón de masa $9{,}1 \times 10^{-31}$ kg y carga $-1{,}6 \times 10^{-19}$ C se mueve a una velocidad de $1{,}6 \times 10^{7}\,m\,s^{-1}$ perpendicularmente a un campo magnético de $1{,}4 \times 10^{-4}$ T. Calcula el radio de su trayectoria.

$$r = \frac{mv}{qB}$$
$$r = \frac{(9{,}1 \times 10^{-31}) \times (1{,}6 \times 10^{7})}{(1{,}6 \times 10^{-19}) \times (1{,}4 \times 10^{-4})}$$
$$r = 0{,}65\,m$$

Aplicaciones

CERN

El mayor laboratorio mundial de física nuclear está ubicado en Ginebra, en la frontera entre Francia y Suiza (véase Figura 5.90). La investigación se realiza bajo la acción coordinada de 20 países europeos.



Figura 5.90
El Gran colisionador de hadrones del CERN está construido bajo tierra y tiene un radio de unos 4 km

Las siglas CERN respondían originalmente a *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* (Consejo europeo para la investigación nuclear), que en la actualidad se denomina *European Organization for Nuclear Research* (Organización europea para la investigación nuclear).

La principal actividad que se lleva a cabo en el CERN es el uso de **aceleradores de partículas** para generar las energías extremadamente elevadas que se necesitan para investigar las fuerzas y las partículas fundamentales de la naturaleza. Para ello, se emplean campos magnéticos extremadamente intensos (mediante superconductores) para forzar a las partículas cargadas a moverse cada vez más rápido describiendo trayectorias circulares.

El CERN tiene una página web de información: **http://home.web.cern.ch/**

1 Averigua qué se investiga en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC, por sus siglas en inglés).

98 **a** Explica cómo es posible que una partícula cargada se mueva a través de un campo magnético sin experimentar una fuerza.
b Explica si es posible que la misma partícula se mueva a través de un campo eléctrico o un campo gravitatorio sin experimentar una fuerza.

99 Una partícula alfa tiene una carga de $+3{,}2 \times 10^{-19}$ C y una masa de $6{,}7 \times 10^{-27}$ kg. Se mueve a través de un campo magnético de intensidad 0,28 T con una velocidad de $1{,}4 \times 10^{7}$ m s^{-1} formando un ángulo de 33° con el campo.
a ¿Qué fuerza actúa sobre la partícula?
b Describe la trayectoria de la partícula alfa a través del campo.

100 **a** ¿Qué intensidad de campo magnético se necesita para proporcionar una fuerza de $1{,}0 \times 10^{-12}$ N sobre cada partícula de un haz de iones, con carga simple ($q = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C) que se mueve perpendicularmente a través del campo con una velocidad de $5{,}0 \times 10^{6}$ m s^{-1}?
b Los iones se mueven siguiendo los arcos de trayectorias circulares de radio 2,78 m. ¿Cuál es su masa?
c Si el haz se reemplaza por otro con iones de la misma masa, carga doble y cuya velocidad es la mitad de la anterior, ¿cuál será el radio de su trayectoria?

101 **a** Los electrones de un haz son acelerados mediante un voltaje de 7450 V. ¿Cuál es la energía cinética de los electrones en:
i electronvoltios
ii julios?
b Calcula la velocidad final de los electrones.
c ¿Qué intensidad de campo magnético se necesita para hacer que estos electrones se muevan describiendo un círculo de radio 14,8 cm?
d ¿Cuál sería el radio de la trayectoria de los electrones bajo el mismo campo magnético pero con un voltaje de aceleración reducido a la mitad?

102 Una carga de $+4{,}8 \times 10^{-19}$ C que se mueve perpendicularmente a través de un campo magnético de $1{,}9 \times 10^{-2}$ T experimenta una fuerza de $9{,}5 \times 10^{-14}$ N.

a ¿Cuál es la velocidad de la partícula?

b ¿Qué campo eléctrico se necesitaría para producir la misma fuerza sobre esta carga?

c Dibuja la trayectoria (que sigue la partícula a través de los campos) en la dirección y sentido convenientes para que estas dos fuerzas sean iguales en módulo y con sentidos opuestos (y así la fuerza resultante sobre la partícula sea cero).

103 Investiga cómo se forman las auroras boreales (véase Figura 5.91).



■ **Figura 5.91**
Aurora boreal

Selección de preguntas de examen

Hoja 1 preguntas del IB y preguntas tipo IB

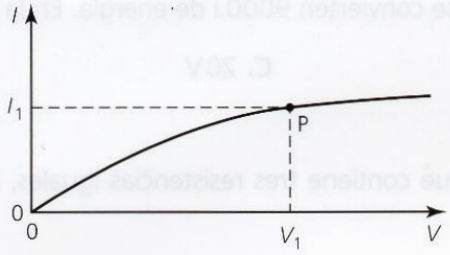
1 ¿Cuáles son las propiedades ideales de los amperímetros y de los voltímetros?

A. amperímetro resistencia cero; voltímetro resistencia cero
B. amperímetro resistencia cero; voltímetro resistencia infinita
C. amperímetro resistencia infinita; voltímetro resistencia cero
D. amperímetro resistencia infinita; voltímetro resistencia infinita.

2 Para acelerar un electrón que está en reposo en el vacío se emplea un voltaje de 3 kV. ¿Cuál es la energía cinética máxima del electrón?

A. 3 eV **B** 3 keV **C** 4,8 eV **D** 4,8 keV

3 En esta gráfica se representa la curva característica $I - V$ para un determinado componente eléctrico.



¿Cuál de las opciones siguientes indica cómo se puede calcular la resistencia del componente en un punto P?

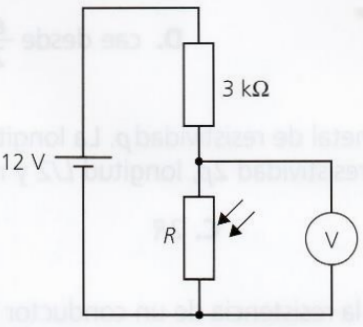
A. $\frac{V_1}{I_1}$ **B.** $\frac{I_1}{V_1}$

C. la pendiente de la curva en el punto P **D.** 1/pendiente en el punto P

4 La unidad del SI para la intensidad de corriente se basa en:

A. la carga que circula por un punto en 1 segundo
B. la potencia transformada por una d.p. de 1 voltio
C. la fuerza sobre un conductor sometido a un campo magnético permanente
D. la fuerza entre dos conductores con corriente paralelos.

5 En este diagrama se representa un circuito divisor de potencial.



Para aumentar la lectura del voltímetro:

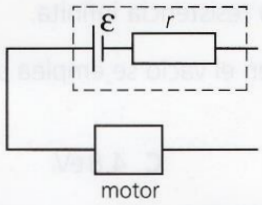
A. Se debe aumentar la temperatura de *R*
B. Se debe disminuir la temperatura de *R*
C. Se debe aumentar la intensidad de la luz sobre *R*
D. Se debe disminuir la intensidad de la luz sobre *R*.

© IB Organization

6 Un calentador eléctrico tiene dos elementos, ambos conectados en paralelo a la misma fuente de alimentación. El primer elemento tiene una resistencia R y una potencia de salida P. El segundo elemento tiene una potencia de salida $4P$. ¿Cuál es su resistencia?

A. $2R$ **B.** $4R$ **C.** $\frac{R}{2}$ **D.** $\frac{R}{4}$

7 Una pila de fem ε y resistencia interna r suministra corriente a un pequeño motor eléctrico.

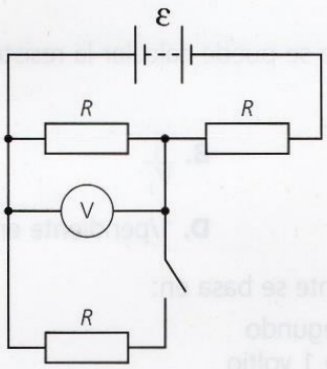


Por el motor circulan 450 C de carga y se convierten 9000 J de energía. En la pila se disipan 1800 J. La fem de la pila es:

A. 4,0 V **B.** 16 V **C.** 20 V **D.** 24 V

© IB Organization

8 Este diagrama representa un circuito que contiene tres resistencias iguales, una batería de fem ε y resistencia interna despreciable y un voltímetro ideal.



Cuando se cierra el interruptor, la lectura del voltímetro:

A. aumenta desde cero hasta $\frac{\varepsilon}{2}$ **B.** aumenta desde cero hasta $\frac{\varepsilon}{3}$

C. cae desde $\frac{\varepsilon}{2}$ hasta $\frac{\varepsilon}{3}$ **D.** cae desde $\frac{\varepsilon}{2}$ hasta $\frac{\varepsilon}{4}$

9 Un hilo conductor está fabricado con un metal de resistividad ρ. La longitud del hilo es L, su radio es r y su resistencia es R. ¿Cuál es la resistencia de otro hilo con resistividad 2ρ, longitud $L/2$ y radio $2r$?

A. R **B.** $\frac{R}{2}$ **C.** $2R$ **D.** $\frac{R}{4}$

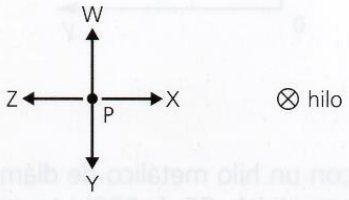
10 ¿Cuál de las afirmaciones siguientes sobre la resistencia de un conductor constituye una interpretación correcta de la ley de Ohm?

A. La resistencia es proporcional a la temperatura.
B. La resistencia es constante si la temperatura es constante.
C. La resistencia es proporcional a la diferencia de potencial si la temperatura es constante.
D. La resistencia es proporcional a la intensidad de corriente si la temperatura es constante.

11 Cuál de las afirmaciones siguientes describe correctamente el proceso de la conducción?

A. En los materiales aislantes no hay electrones.
B. La corriente que circula por un conductor sólido es transportada por las cargas positivas que se mueven hacia el borne negativo de la batería.
C. Los metales son buenos conductores porque están llenos de electrones libres.
D. Una corriente que circula por un conductor sólido consiste en electrones que se mueven en la dirección y en el sentido del campo magnético.

12 En este diagrama, el hilo largo con corriente es normal al plano del papel. La corriente que circula por el hilo va hacia dentro del plano del papel.



¿Cuál de las flechas representa la dirección y el sentido del campo magnético en el punto P?

A. W **B.** X **C.** Y **D.** Z

© *IB Organization*

13 Una corriente de intensidad 2 A está compuesta por electrones que circulan a través de un hilo metálico con un área transversal de 1 mm^2. Si el metal contiene 4×10^{28} electrones libres por metro cúbico, el mejor valor estimado para la velocidad de deriva de los electrones es:

A. $1 \times 10^{-4} m s^{-1}$ **B.** $3 \times 10^{-4} m s^{-1}$ **C.** $1 \times 10^{-10} m s^{-1}$ **D.** $3 \times 10^{-10} m s^{-1}$.

14 ¿Cuál de las siguientes opciones es una afirmación incorrecta sobre las leyes de Kirchhoff de los circuitos?

A. Solo se pueden utilizar si la temperatura es constante.
B. $\Sigma I = 0$ (nodo) indica que la carga se conserva.
C. $\Sigma V = 0$ (circuito cerrado) indica que la energía se conserva.
D. Las leyes se pueden aplicar a cualquier circuito eléctrico.

15 La ecuación:

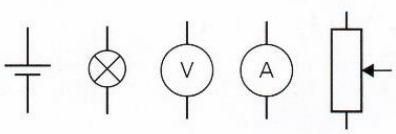
$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

describe la fuerza entre dos cargas eléctricas. ¿Cuál de las siguientes opciones es una afirmación correcta sobre esta ecuación?

A. k se conoce como constante de Boltzmann.
B. r es el radio de las esferas sobre las que están situadas las cargas.
C. La ecuación se aplica a cargas puntuales.
D. La ecuación solo se puede aplicar a campos eléctricos uniformes.

Hoja 2 preguntas del IB y preguntas tipo IB

1 Los componentes que se muestran abajo se van a conectar a un circuito para estudiar la variación de la intensidad de corriente I que circula por una lámpara de filamento de tungsteno respecto a la diferencia de potencial V a la que está sometida.



a Construye un diagrama de circuito donde se represente cómo se deberían conectar estos componentes para que el intervalo de valores de la diferencia de potencial a través de la lámpara sea lo más amplio posible. (4)

b Copia el sistema de coordenadas de la figura y utilízalo para esbozar una gráfica de I en función de V para una lámpara incandescente en el intervalo desde $V = 0$ hasta su voltaje operativo normal. (2)



© IB Organization

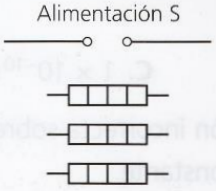
2 a Un serpentín calefactor está construido con un hilo metálico de diámetro $3{,}5 \times 10^{-4}$ m. El calentador disipa 980 W cuando se conecta a una fuente de alimentación de CC de 230 V. La resistividad del material del hilo es $1{,}3 \times 10^{-6}\,\Omega$m a la temperatura de funcionamiento del calentador.

i. Define el concepto de resistencia eléctrica. (1)

ii. Calcula la resistencia del serpentín a su temperatura normal de funcionamiento. (2)

iii. Demuestra que la longitud de hilo necesaria para construir el serpentín es aproximadamente 4 m. (2)

b Tres calentadores eléctricos idénticos suministran respectivamente una potencia P cuando se conectan por separado a una fuente de alimentación S cuya resistencia interna es cero. Copia el diagrama y completa el circuito dibujando dos interruptores de manera que la potencia suministrada por el calentador sea P o $2P$ o $3P$. (2)



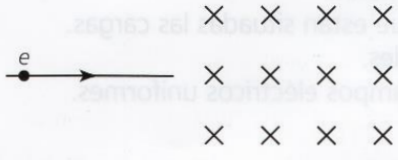
© IB Organization

3 Un estudiante quiere determinar cuánta energía se puede obtener a partir de una pila eléctrica simple fabricada con dos electrodos metálicos insertados en una patata.

a Dibuja un diagrama de circuito donde se indique cómo debería conectar el estudiante los instrumentos de medida. (2)

b Haz una lista de las medidas que debería realizar el estudiante. (3)

4 En este diagrama se representa un electrón que viaja a una velocidad de $6{,}0 \times 10^{6}\,\text{m s}^{-1}$ y que entra en un campo magnético uniforme de intensidad $2{,}3 \times 10^{-2}$ T.



a Calcula el módulo de la fuerza que actúa sobre el electrón cuando está atravesando el campo. (2)

b Describe y explica la trayectoria del electrón en el campo. (3)

6 Movimiento circular y gravitación

IDEAS FUNDAMENTALES

- Una fuerza aplicada perpendicularmente a su desplazamiento puede producir un movimiento circular.
- La idea newtoniana de la fuerza gravitatoria que actúa entre dos cuerpos esféricos y las leyes de la mecánica crean un modelo que se puede usar para calcular el movimiento de los planetas.

6.1 Movimiento circular

Una fuerza aplicada perpendicularmente a su desplazamiento puede producir un movimiento circular

Un objeto que se mueve a lo largo de una trayectoria circular con una rapidez constante tiene una velocidad que cambia continuamente, porque su dirección de movimiento también va cambiando en todo momento. Según la primera ley de Newton, cualquier objeto que no se mueve en línea recta debe estar acelerando y, por lo tanto, debe haber una fuerza resultante que actúe sobre él, incluso aunque se mueva a una rapidez constante.

Es posible que el movimiento perfectamente uniforme en círculos completos no sea un hecho que observemos habitualmente de forma cotidiana, pero la teoría del movimiento circular también se puede aplicar a las personas o a los vehículos que se mueven describiendo arcos de circunferencia, curvas o giros. La teoría del movimiento circular también resulta muy útil cuando se estudian las órbitas de los planetas y los satélites artificiales o naturales, así como para explicar el movimiento de las partículas subatómicas en los campos magnéticos, tal como hemos explicado en el Capítulo 5.

Imagina que estás de pie dentro de un tren sobre un suelo resbaladizo y que te apoyas en un poste (Figura 6.1). Mientras el tren y tú viajáis en línea recta a una rapidez constante (velocidad constante), no hay ninguna fuerza resultante que actúe sobre ti y no es necesario que te sujetes al poste, pero en cuanto el tren cambia su movimiento (es decir, acelera) debe haber una fuerza resultante que actúa sobre ti para que te mantengas en el mismo sitio dentro del tren. Si la fricción con el suelo es mínima o inexistente, el poste es el único objeto que puede ejercer una fuerza sobre ti para cambiar tu movimiento. En el diagrama se muestran las direcciones de estas fuerzas (desde el poste) para los distintos tipos de aceleración. Si el poste tira de ti o te empuja, según la tercera ley de Newton tú debes tirar del poste o empujarlo, y esta es la fuerza de la que serías más consciente.

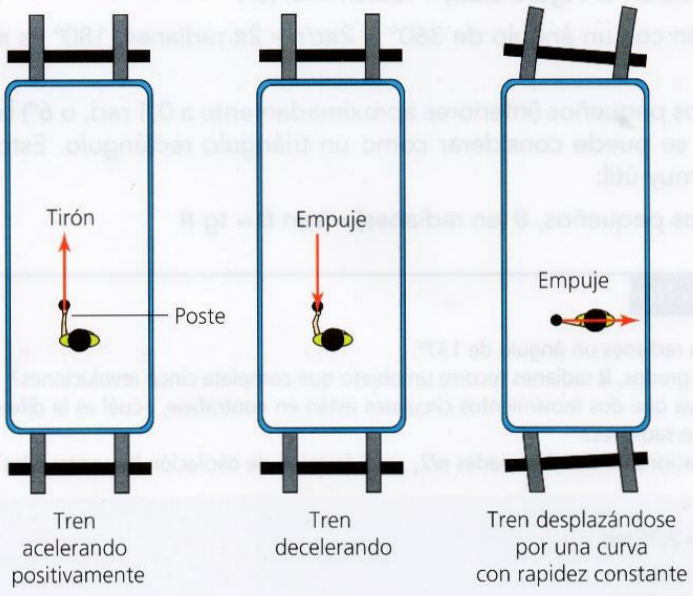


Figura 6.1 *Fuerzas que hacen que un pasajero acelere dentro de un tren*

Observemos, en particular, que la dirección de la fuerza necesaria para crear una trayectoria curva y circular es perpendicular al movimiento instantáneo.

Periodo, frecuencia, desplazamiento angular y velocidad angular

Antes de profundizar en la teoría del movimiento circular vamos a repasar la definición de algunos términos que se usan habitualmente en esta rama de la física.

El **periodo**, T, de un movimiento circular se define como el tiempo que tarda un objeto en completar una rotación (360°).

La **frecuencia**, f, de un movimiento circular se define como el número de rotaciones en una unidad de tiempo (normalmente un segundo).

Estas definiciones son parecidas a las que hemos visto en el Capítulo 4 (al hablar de las oscilaciones y las ondas). Tal y como hemos indicado, el periodo y la frecuencia se relacionan mediante esta sencilla ecuación:

$$f = \frac{1}{T}$$

Desplazamiento angular

En el Capítulo 2 hemos explicado que el desplazamiento lineal es una medida de la distancia desde un punto de referencia fijo. Para el movimiento circular, el desplazamiento se mide en ángulos.

El desplazamiento angular, θ, se define como el ángulo que ha rotado un objeto rígido desde una posición de referencia fija.

Por ejemplo, se puede rotar un cuerpo 198° en la dirección contraria a las agujas del reloj, o 457° en la dirección de las agujas del reloj. Una rotación de más de 360° implica más de una vuelta completa.

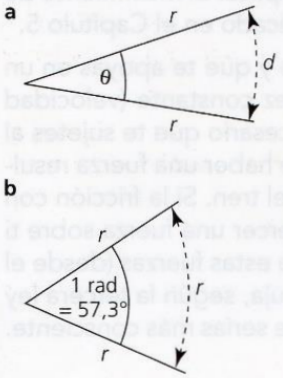


Figura 6.2
a *El ángulo θ (en radianes) es igual a d/r*
b *Un radián*

Ahora vamos a presentar una unidad alternativa y más adecuada para la medida de ángulos: el **radián**. En la Figura 6.2 el ángulo θ (en radianes) es igual a la distancia, d, a lo largo del arco de la circunferencia dividida por el radio, r.

$$\theta \text{ (en radianes)} = \frac{d}{r}$$

Observemos que un ángulo expresado en radianes es el cociente entre dos longitudes y que, como tal, la unidad (el radián) no se creó a partir de una decisión arbitraria o histórica (como la elección de los 360 grados que conforman un círculo).

Un radián es la amplitud de un ángulo cuyo arco es igual a la longitud del radio ($\theta = r/r = 1$), tal como se muestra en el Figura 6.2b; 1 radián = 57,3°.

Una rotación con un ángulo de 360° = $2\pi r/r = 2\pi$ radianes; 180° es π radianes y 90° es $\pi/2$ radianes.

Para ángulos pequeños (inferiores aproximadamente a 0,1 rad, o 6°) la forma que se muestra en la Figura 6.2a se puede considerar como un triángulo rectángulo. Esto nos permite aplicar una aproximación muy útil:

para ángulos pequeños, θ (en radianes) ≈ sen θ ≈ tg θ

Ejemplo resuelto

1 **a** Convierte a radianes un ángulo de 137°.
b ¿Cuántos **i** grados, **ii** radianes recorre un objeto que completa cinco revoluciones?
c Si se observa que dos movimientos circulares están en contrafase, ¿cuál es la diferencia de fase entre ellos **i** en grados, **ii** en radianes?
d Si dos oscilaciones están desfasadas $\pi/2$, ¿qué fracción de oscilación hay entre ellas?

a $\frac{137 \times 2\pi}{360} = 2{,}39\,\text{rad}$
b **i** $5 \times 360 = 1800°$
ii $5 \times 2\pi = 31{,}4\,\text{rad}$
c **i** 180°
ii π rad
d $\pi/2$ = ¼ de oscilación

Velocidad angular

Una magnitud que resulta clave en la descripción del movimiento de traslación es la velocidad (cambio en el desplazamiento lineal/cambio en el tiempo). Análogamente, para describir el movimiento circular utilizamos la expresión «cambio en el desplazamiento angular/cambio en el tiempo», que es lo que se conoce como velocidad angular. La **velocidad angular**, que en ocasiones también se denomina frecuencia angular, se identifica con el símbolo ω y su unidad es el rad s^{-1}.

$$\text{velocidad angular, } \omega = \frac{\Delta \text{ desplazamiento angular}}{\Delta \text{ tiempo}}$$

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

Dado que en una oscilación se completan 2π radianes en un periodo, T, para una rotación continua uniforme:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Además, como $f = \frac{1}{T}$:

$$\omega = 2\pi f$$

Estas tres ecuaciones, que se emplean de forma generalizada para el cálculo de ω, no figuran en el *Apéndice de datos de Física*.

El periodo, la frecuencia y la velocidad angular son tres conceptos que representan exactamente la misma información para el movimiento circular uniforme. Por ejemplo, si el periodo T de un oscilador es 0,20 s, sabemos que su frecuencia es 5,0 Hz (porque $f = 1/T$) y su velocidad angular es 31 rad s^{-1} (porque $\omega = 2\pi/T$).

Cuando nos facilitan información, por ejemplo para resolver un problema, lo más probable es que nos indiquen el periodo o la frecuencia de rotación; aunque, para realizar los cálculos normalmente necesitaremos la velocidad angular, ω.

Ejemplo resuelto

2 Si un objeto completa exactamente 20 rotaciones en 34,6 s, calcula:
a su frecuencia
b su velocidad angular.

a $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{(34{,}6/20{,}0)} = 0{,}578\,\text{Hz}$
b $\omega = 2\pi f = 2\pi\,(0{,}578) = 3{,}63\,\text{rad}\,\text{s}^{-1}$

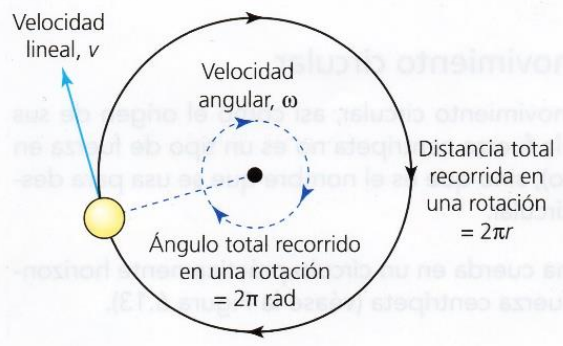


Figura 6.3
Relación entre velocidad lineal y velocidad angular

Relación entre la velocidad de una masa que describe un movimiento circular, *v*, y su velocidad angular, ω

Si una masa (puntual) describe un movimiento circular con una velocidad lineal constante, tal como se muestra en la Figura 6.3, también tiene una velocidad angular constante y debe haber una relación sencilla entre ambas velocidades.

Como la velocidad lineal, $v = 2\pi r/T$ y la velocidad angular, $\omega = 2\pi/T$ (si medimos los ángulos en radianes):

$$v = \omega r$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Ejemplo resuelto

3 Una masa puntual completa 14,7 rotaciones en un minuto exactamente:
a ¿Cuál es su velocidad angular?
b Si su distancia al centro de rotación es 58 cm, ¿cuál es su velocidad lineal?

a $\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$

$\omega = 14{,}7 \times \frac{2\pi}{60} = 1{,}54\,\text{rad s}^{-1}$

b $v = \omega r$

$v = 1{,}54 \times 0{,}58 = 0{,}89\,\text{m s}^{-1}$

1 Convierte los ángulos siguientes a radianes:
a 180°
b 90°
c 45°
d 112°

2 Si el desplazamiento angular de un objeto es $3\pi/2$, ¿qué distancia ha recorrido a lo largo de la circunferencia de un círculo cuyo radio es 50 cm?

3 **a** Convierte un ángulo de 5,00° a radianes.
b ¿Cuál es el seno de 5,00°?
c ¿Qué porcentaje de error cometemos si suponemos que el seno de 5,00° equivale al ángulo de 5,00° expresado en radianes?

4 Una bicicleta se mueve con una velocidad lineal de 8,2 m s^{-1}.
a Si el radio de las ruedas es 31 cm, ¿cuál es su velocidad angular?
b Calcula la frecuencia de rotación de las ruedas.

5 Una masa pequeña se mueve describiendo un círculo de radio 1,32 m con un periodo de 2,77 s.
a ¿Cuál es su frecuencia?
b ¿Cuál es su velocidad angular?
c ¿Cuál es su velocidad lineal?

Fuerza centrípeta

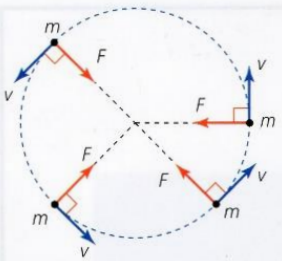


Figura 6.4
Vectores de velocidad y fuerza centrípeta durante el movimiento circular

La Figura 6.4 muestra cuatro posiciones al azar de la misma masa, *m*, que se mueve siguiendo una trayectoria circular con una rapidez constante. Las flechas azules representan la velocidad instantánea, *v*, de la masa en distintos puntos de la circunferencia. La dirección de las velocidades es siempre *tangencial* al círculo. Cualquier fuerza, *F*, que origina un movimiento circular se denomina **fuerza centrípeta** y siempre actúa perpendicularmente a la velocidad, hacia el interior del centro del círculo, tal como muestran las flechas rojas de la Figura 6.4. Como la fuerza es perpendicular al movimiento, no produce ningún cambio en la rapidez, pero sí un cambio continuo en la dirección. Esta fuerza centrípeta resultante que actúa sobre la masa tiene siempre el mismo módulo pero cambia continuamente de dirección.

Como la fuerza es siempre perpendicular al movimiento, el trabajo realizado (la energía transferida) por una fuerza centrípeta que hace que un objeto se mueva describiendo un círculo es siempre cero.

Ejemplos de fuerzas que producen un movimiento circular

La lista siguiente incluye algunos ejemplos de movimiento circular, así como el origen de sus fuerzas centrípetas. Es importante comprender que la fuerza centrípeta no es un tipo de fuerza en sí misma (como la gravedad o la fricción, por ejemplo), sino que es el nombre que se usa para describir cualquier fuerza que provoca un movimiento circular.

- Si se hace girar un objeto fijado al extremo de una cuerda en un círculo prácticamente horizontal, la tensión de la cuerda es la que produce la fuerza centrípeta (véase la Figura 6.13).

- La gravedad proporciona la fuerza centrípeta que mantiene en órbita a los planetas y a los satélites naturales o artificiales.
- La ropa que se introduce en una lavadora o secadora se mueve en círculos porque los laterales del tambor empujan hacia el interior. El agua puede atravesar los agujeros, en los que no hay fuerza centrípeta.
- Un coche puede girar en una curva gracias a la fricción entre la carretera y los neumáticos (Figura 6.5).
- Una persona que dobla una esquina necesita la fuerza de fricción existente entre sus pies y el suelo para poder cambiar de dirección.
- El pasajero de un coche puede seguir una trayectoria circular gracias a la fuerza que existe entre su asiento y él. Si el coche se mueve más rápido, es posible que el lateral del coche también tenga que ejercer una fuerza hacia el interior sobre el pasajero, aunque este tenga la sensación de que le están empujando hacia fuera.
- Un avión cambia de dirección con la ayuda de la fuerza que ejerce el aire sobre las alas cuando el avión se inclina.
- Un tren puede circular por las curvas gracias a la fuerza de reacción normal que ejercen las vías del tren sobre las ruedas (Figura 6.6).
- Cuando un objeto se mueve describiendo una trayectoria curvilínea en una superficie inclinada (véase la Figura 6.7), la fuerza de reacción normal, R, tendrá una componente horizontal, R_H, que puede aportar más fuerza centrípeta si la fricción no es suficiente a velocidades altas. Se dice que esta superficie, o vía, está **peraltada** (Figura 6.8).
- Se puede considerar que un electrón sigue una órbita circular alrededor de un núcleo debido a la fuerza eléctrica que hay entre ambos.
- Las partículas con carga eléctrica (iones, electrones y protones) pueden describir trayectorias circulares cuando atraviesan perpendicularmente los campos magnéticos en el vacío (véase la Sección 5.4).

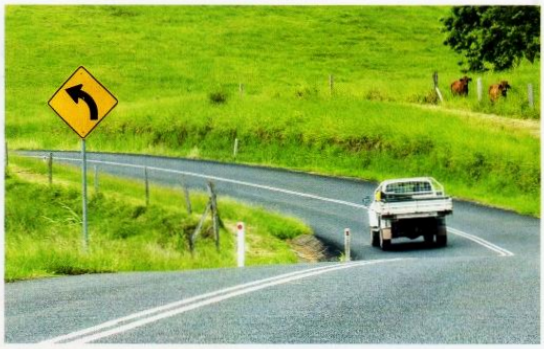


Figura 6.5

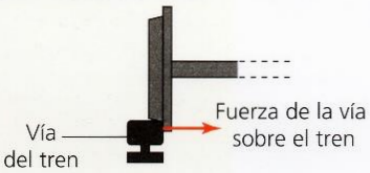


Figura 6.6
La vía del tren ejerce una fuerza hacia dentro sobre la rueda del tren, que sigue una trayectoria circular

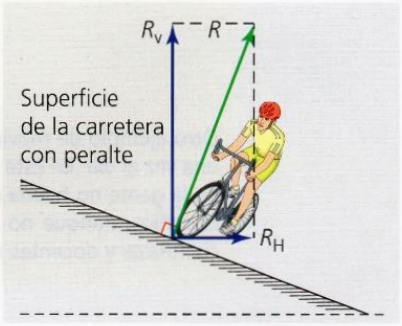


Figura 6.7
Fuerzas que actúan sobre un ciclista en una superficie peraltada



Figura 6.8
Ciclistas en el velódromo durante los Juegos Olímpicos de Londres 2012

6 Dibuja un diagrama de cuerpo libre de un aeroplano inclinándose.

7 Explica por qué se puede ver cómo un ciclista o un corredor «se inclinan» en una curva cuando van rápido.

8 ¿Qué origina la fuerza centrípeta de las ruedas de un coche o una bicicleta cuando giran?

9 Explica por qué un satélite que describe una órbita circular alrededor de la Tierra no necesita un motor para mantenerse en movimiento.

Naturaleza de la ciencia

Una explicación común para diversas observaciones

La lista anterior ofrece numerosos ejemplos de diferentes movimientos circulares, o movimientos en arcos y círculos, o simplemente movimientos que se desvían de trayectorias lineales. Actualmente los físicos creen que *todos* estos ejemplos requieren explicaciones similares en relación con fuerzas que actúan radialmente hacia el interior.

Esta idea no es tan obvia y han tenido que transcurrir siglos de observaciones y análisis para llegar a una conclusión tan «sencilla». Incluso hoy en día, mucha gente confunde la fuerza *centrípeta* con la fuerza *centrífuga* (que no mencionamos en este curso).

La búsqueda de explicaciones sencillas y unificadas de diversas observaciones es un tema común en la ciencia, un tema que requiere la suposición fundamental de que el universo no puede ser tan complicado como parece, y que, por lo tanto, dicho análisis es posible.

Enlace con la teoría del conocimiento

¿Debemos creer en cosas que no podemos detectar a través de los sentidos?

El péndulo de Foucault es una prueba sencilla y visible de la rotación de la Tierra, un fenómeno que es totalmente inobservable. ¿Cómo podemos llegar al conocimiento de aquello que no se puede observar?



Figura 6.9 *Péndulo de Foucault*

Otro ejemplo de movimiento circular es el de la Tierra (y de todos sus habitantes) que da una vuelta sobre sí misma una vez al día. En este caso es la gravedad la que origina la fuerza centrípeta necesaria. Hace miles de años la mayoría de la gente no habría creído que la Tierra gira sobre sí misma. Actualmente casi todo el mundo acepta este «hecho» científico, aunque no haya visto ninguna evidencia directa. ¿Nos parece más razonable creer lo que nos dicen los científicos y docentes que confiar en nuestros propios sentidos?

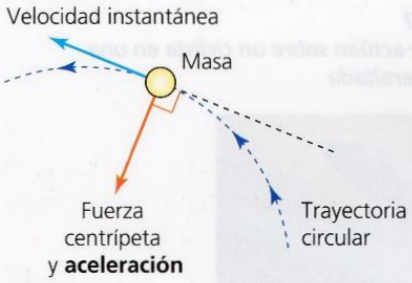


Figura 6.10
Fuerza centrípeta y aceleración

Aceleración centrípeta

Sabemos que una fuerza resultante provoca una aceleración, *a*. Por lo tanto, una fuerza centrípeta ejercida hacia el centro debe provocar una **aceleración centrípeta**, también hacia el centro del círculo. Podemos observarlo con mayor claridad en la Figura 6.10. Aunque hay una aceleración dirigida hacia el centro, no hay ningún movimiento en esa dirección ni ningún cambio en la velocidad de la masa. No obstante, la acción de la fuerza cambia continuamente la *dirección* del movimiento de la masa. Recuerda que la aceleración implica un cambio en la velocidad, y la velocidad de una masa puede cambiar si va más rápido, si va más lento o si se *modifica su dirección*.

Ecuaciones de la aceleración centrípeta y la fuerza centrípeta

Cuando un objeto que sigue una trayectoria circular pasa a tener una mayor velocidad, *v*, o un menor radio, *r*, la aceleración centrípeta y la fuerza deben ser mayores. Este principio es el que se representa en la ecuación que permite calcular el módulo de la aceleración centrípeta:

$$a = \frac{v^2}{r}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Dado que la velocidad en un círculo es igual a la longitud de la circunferencia dividida por el tiempo que se tarda en completarla (el periodo T), la velocidad $v = \frac{2\pi r}{T}$.

La ecuación de la aceleración centrípeta se puede reescribir del modo siguiente:

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{(2\pi r/T)^2}{r}$$

y por lo tanto:

$$a = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Como $F = ma$, la expresión de la fuerza centrípeta necesaria para que una masa, m, se mueva en un círculo de radio, r, a una velocidad constante, v, es:

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

O, como $v = \omega r$, la ecuación de la fuerza centrípeta se puede reescribir del modo siguiente:

$$F = m\omega^2 r$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

En la Figura 6.11, aunque los dos niños tienen la misma velocidad angular, el mayor necesita una fuerza centrípeta muy superior porque su masa también es mayor y se desplaza a una velocidad más elevada.

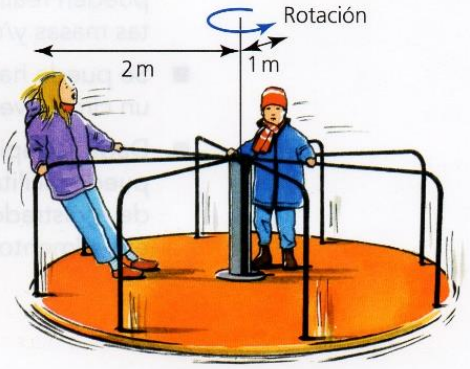


Figura 6.11
Niños en un columpio giratorio

Perspectivas adicionales

Obtención de la expresión $a = \frac{v^2}{r}$

Consideremos una masa que se mueve siguiendo una trayectoria circular de radio r, tal como se muestra en la Figura 6.12a. Cuando se traslada de A hasta B, se desplaza un ángulo, θ, y una distancia, Δd, a lo largo de la circunferencia, mientras su velocidad cambia de v_A a v_B.

Para calcular la aceleración necesitamos saber cuánto ha variado la velocidad, Δv. Esto se calcula usando el diagrama vectorial que se muestra en la Figura 6.12b. Observemos que la dirección del cambio de velocidad (y, por lo tanto, de la aceleración) es hacia el centro del movimiento.

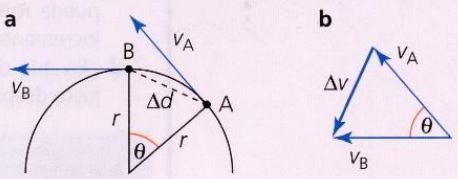


Figura 6.12
Obtención de una ecuación para la aceleración centrípeta

Los dos triángulos son similares y, si el ángulo es lo suficientemente pequeño como para que Δd sea prácticamente una línea recta, podemos escribir:

$$\theta = \frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta d}{r}$$

(Los módulos de v_A y v_B son iguales y se representan con la velocidad, v).

Si se dividen ambos miembros de la ecuación entre Δt, obtenemos:

$$\frac{\Delta v}{\Delta t \times v} = \frac{\Delta d}{\Delta t \times r}$$

Entonces, como $a = \Delta v/\Delta t$ y $\Delta d/\Delta t = v$:

$$a = \frac{v^2}{r}$$

1 La órbita que describe la Tierra alrededor del Sol es aproximadamente circular, siendo la longitud media del radio unos 150 millones de kilómetros. Calcula la aceleración centrípeta de la Tierra hacia el Sol.



Estudios experimentales del movimiento circular

- Una forma directa de estudiar el movimiento circular es haciendo girar en círculos una pequeña masa sujeta al final de un trozo de cordel. Véase la Figura 6.13. (La masa debe asegurarse bien y el cordel debe ser lo suficientemente resistente como para no romperse). Será necesario idear un método para medir la fuerza que se ejerce sobre el cordel.
- Las atracciones de feria ofrecen muchos ejemplos interesantes de movimiento en arcos de circunferencia, como las que ofrecen a los pasajeros la oportunidad de desplazarse arriba y abajo (dando giros completos). Véase la Figura 6.15 y el Ejemplo resuelto 5. Las medidas de los tiempos y las estimaciones de las distancias permiten el cálculo aproximado de los módulos de las fuerzas que actúan sobre los pasajeros.
- Una moneda (u otra masa) que se encuentra sobre una plataforma giratoria solo puede permanecer en su posición si hay suficiente fricción para facilitar la fuerza centrípeta necesaria. Se pueden realizar observaciones mientras la velocidad angular aumenta poco a poco (con distintas masas y/o diferentes posiciones y/o distintas superficies).
- Se puede hacer girar con la mano y de forma segura un cubo con agua haciendo que describa un círculo vertical si se mueve lo suficientemente rápido.
- Dada la rápida velocidad de muchas rotaciones, el análisis en vídeo del movimiento circular puede facilitar las observaciones y las medidas, permitiendo que estas sean más exactas. El uso de registradores de datos para medir las fuerzas centrípetas también permite perfeccionar los experimentos que estudian el movimiento rápido.

Ejemplos resueltos

4 Considera una pelota de 72 g de masa que gira sujeta al final de un trozo de cordel a una velocidad constante de 3,4 m s^{-1} y describe un círculo (casi) horizontal de radio 65 cm, tal como se muestra en la Figura 6.13.

a Calcula la aceleración y la fuerza centrípetas.

b Explica por qué la fuerza que ejerce el cordel no puede actuar horizontalmente.

c Explica un posible motivo por el que se puede romper el cordel si la velocidad se incrementa a 5,0 m s^{-1}.

d ¿En qué dirección se desplazará la pelota justo después de que se rompa el cordel?

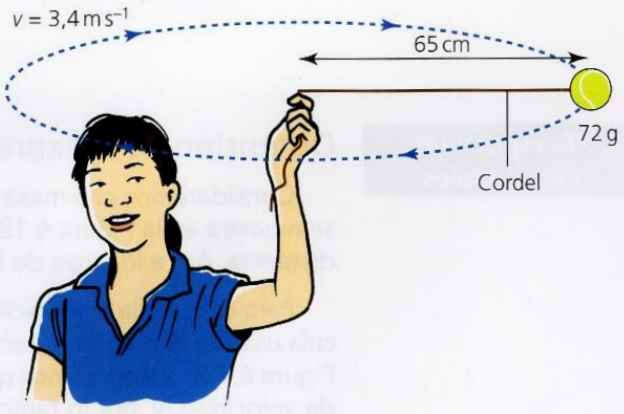


Figura 6.13

a $a = \frac{v^2}{r}$

$a = \frac{3{,}4^2}{0{,}65}$

$a = 18\ \text{m s}^{-2}$

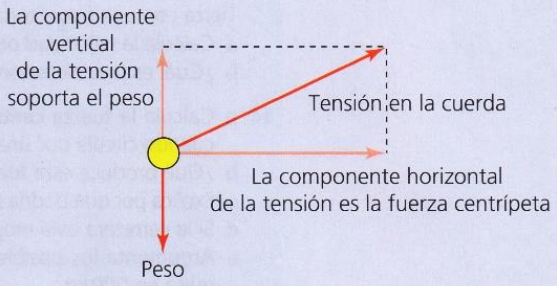
$F = ma$

$F = 0{,}072 \times 18{,}0 = 1{,}3\ \text{N}$

b Si la fuerza es horizontal, no puede tener una componente vertical con la que soportar el peso de la pelota (véase la Figura 6.14).

c Como la velocidad de la pelota se incrementa, se necesita una fuerza centrípeta mayor para el mismo radio. Si esta fuerza es mayor que la que puede ejercer el cordel, este se romperá.

d La pelota seguirá una trayectoria recta con su velocidad instantánea cuando se rompa el cordel. Se moverá tangencialmente al círculo, pero la gravedad también afectará a su movimiento.



■ **Figura 6.14**
Diagrama de cuerpo libre para una pelota girando en círculo

5 A los niños les encantan los columpios giratorios y los adultos de todo el mundo parecen disfrutar con las atracciones de las ferias (véase la Figura 6.15). Explica cómo es posible que los pasajeros estén boca abajo sin que se caigan de sus asientos.

Los pasajeros no se caen porque su velocidad es suficientemente elevada, de modo que la fuerza centrípeta necesaria para que sigan moviéndose en una trayectoria circular es mayor que su peso.

En la parte superior del círculo, las fuerzas que actúan hacia abajo sobre un pasajero son su peso (constante) y la fuerza de reacción del asiento (variable), si está en contacto con él. La fuerza resultante se calcula sumando estas dos fuerzas. Si la fuerza centrípeta necesaria es mayor que su peso, seguirá en contacto con el asiento y la fuerza adicional que se requiere la proporciona el asiento. Si su peso es mayor que la fuerza centrípeta necesaria (porque la velocidad es demasiado lenta), entonces se caerá de la atracción.



■ **Figura 6.15**
Boca abajo en una atracción de feria

6 Un coche de 1240 kg de masa se mueve a lo largo de una curva de radio 63 m por una carretera horizontal a una velocidad de 18 m s^{-1}. Si el coche se moviera más rápido, no habría suficiente fricción y comenzaría a derrapar.

a Determina un valor para el coeficiente de fricción entre la carretera y los neumáticos.

b ¿Se trata de un coeficiente de fricción estática o de fricción dinámica?

c ¿Se podría conducir un coche más pesado más rápido en esta curva?

a Fuerza centrípeta = fuerza de fricción

$$\frac{mv^2}{r} = \mu mg$$

$$\frac{1240 \times 18^2}{63} = \mu \times 1240 \times 9{,}81$$

$$\mu = 0{,}52$$

b Estática, porque, antes de derrapar, el coche no se movía en la dirección de la fuerza centrípeta de fricción.

c No. Si se usa la ecuación de arriba, la masa se anula. La fuerza centrípeta adicional necesaria la origina la fricción adicional.

10 Un tren de juguete de 432 g de masa se mueve por una vía circular de 67 cm de radio a una velocidad constante de 25 cm s^{-1}.

a Calcula la aceleración centrípeta del tren.

b ¿Cuál es la fuerza resultante que actúa sobre el tren (en módulo y dirección)?

c ¿Cuánto tiempo tarda el tren en dar una vuelta completa?

11 El martillo que se lanza en la Figura 6.16 completa dos círculos de radio 2,60 m a una velocidad constante de 1,38 s justo antes de ser lanzado. Si asumimos que el movimiento es horizontal:

a ¿Cuál es su aceleración centrípeta?

b ¿Qué fuerza tiene que ejercer la lanzadora sobre el martillo si su masa es de 4,0 kg?

c La lanzadora tendrá que lanzar el martillo cuando se esté moviendo a un ángulo de 45° con la horizontal. Explica por qué.

12 a ¿Qué velocidad angular se alcanza cuando una fuerza centrípeta de 84 N actúa sobre una masa de 580 g que se mueve en un círculo de 1,34 m de radio?

b ¿Cuánto tiempo tardará la masa en completar diez vueltas?



■ **Figura 6.16**

13 La distancia entre la Luna y la Tierra varía, pero en promedio es de 380 000 km. La Luna da vueltas alrededor de la Tierra con una trayectoria aproximadamente circular cada 27,3 días.
- **a** Calcula la velocidad orbital de la Luna en $m\,s^{-1}$.
- **b** ¿Cuál es la aceleración centrípeta de la Luna hacia la Tierra?

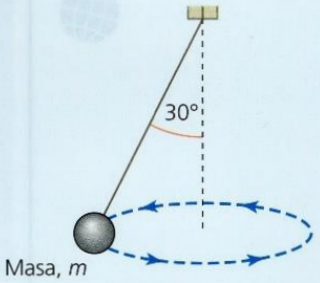
14 **a** Calcula la fuerza centrípeta necesaria para que un coche de 1200 kg de masa se continúe moviendo a $15\,m\,s^{-1}$ cuando circula por una curva de 60 m de radio.
- **b** ¿Qué produce esta fuerza?
- **c** Explica por qué podría ser peligroso para el conductor intentar conducir al doble de esta velocidad por la misma curva.
- **d** Si la carretera está mojada o hay hielo, ¿por qué debe el conductor ir más despacio?
- **e** Argumenta los posibles efectos sobre la seguridad si el coche llevara pasajeros y equipaje que incrementaran la masa en 500 kg.

15 Puedes hacer girar un cubo con agua y lograr que describa un círculo vertical por encima de tu cabeza sin que el agua se derrame, si la fuerza centrípeta necesaria es mayor que el peso.
- **a** Calcula la velocidad mínima que debe tener el cubo con agua si el radio del círculo es 90 cm.
- **b** ¿Cuántas vueltas da por segundo?

16 Un chico con una masa de 65 kg que está en el ecuador terrestre da vueltas con la Tierra a una velocidad aproximada de $460\,m\,s^{-1}$.
- **a** ¿Qué fuerza centrípeta resultante se necesita para mantenerlo en movimiento en un círculo? (sabiendo que el radio de la Tierra es $6{,}4 \times 10^6$ m).
- **b** ¿Cuánto pesa el chico?
- **c** Dibuja un diagrama de cuerpo libre del chico en el que estén bien indicadas todas las fuerzas.

17 La Figura 6.17 muestra un péndulo de 120 g de masa que se balancea describiendo un círculo horizontal.
- **a** Dibuja un diagrama libre de cuerpo libre de la masa, *m*.
- **b** Calcula la fuerza centrípeta que actúa sobre la masa.
- **c** Si el radio del círculo es 28,5 cm, ¿cuál es la velocidad del péndulo y cuánto tarda en completar una vuelta?

18 ¿Cuál es la máxima velocidad a la que puede circular un coche por una curva de 49 m de radio en una carretera horizontal si el coeficiente de fricción es 0,76?



■ **Figura 6.17**

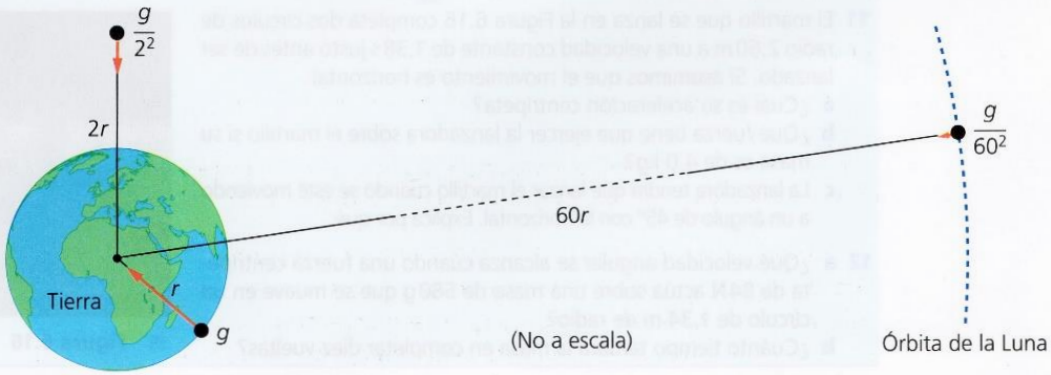
6.2 Ley de gravitación de Newton

La idea newtoniana de la fuerza gravitatoria que actúa entre dos cuerpos esféricos y las leyes de la mecánica crean un modelo que se puede usar para calcular el movimiento de los planetas

■ La gravitación universal y la ley del inverso del cuadrado

Isaac Newton fue el primero en darse cuenta de que si la fuerza de la gravedad hace que los objetos (las manzanas, por ejemplo) caigan hacia la Tierra y también mantiene la Luna en órbita alrededor de la Tierra, es razonable asumir que la fuerza de la gravedad actúa entre *todas* las masas. Este es el motivo de que la llamara gravitación *universal*. Newton creía que la fuerza gravitatoria entre dos masas aumenta con el tamaño de las masas y se reduce cuando se incrementa la distancia entre ellas, siguiendo una *ley del inverso del cuadrado* (véase la página 162).

La distancia entre la Tierra y la Luna equivale a 60 radios terrestres, y Newton fue capaz de demostrar que la aceleración centrípeta de la Luna hacia la Tierra (a partir de v^2/r) era igual a $g/60^2$ (véase la Figura 6.18).



■ **Figura 6.18**
Variación de la aceleración debida a la gravedad respecto a la distancia a la Tierra

Ejemplo resuelto

7 La distancia promedio entre la Tierra y la Luna es 384 000 km y la Luna tarda 23,7 días en efectuar una órbita completa alrededor de la Tierra.
- **a** Calcula la velocidad orbital media de la Luna.
- **b** ¿Cuál es la aceleración centrípeta de la Luna hacia la Tierra?
- **c** Compara tu respuesta en **b** con $g/60^2$.

a $v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{(2 \times \pi \times 3{,}84 \times 10^8)}{(27{,}3 \times 24 \times 3600)} = 1{,}02 \times 10^3\,\text{m s}^{-1}$

b $a = \frac{v^2}{r} = \frac{(1{,}02 \times 10^3)^2}{3{,}84} \times 10^8 = 2{,}71 \times 10^{-3}\,\text{m s}^{-2}$

c $9{,}81/60^2 = 2{,}73 \times 10^{-3}\,\text{m s}^{-2}$. Las dos respuestas difieren en centésimas, lo cual es una buena prueba de que las leyes del inverso del cuadrado representan a las aceleraciones gravitatorias (y las fuerzas).

Ley de gravitación de Newton

Las fuerzas que actúan entre dos **masas puntuales** (M y m) son proporcionales al producto de las masas e inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia que las separa (r).

$$F \propto Mm$$

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

Si añadimos una constante de proporcionalidad a esta relación, obtenemos la ley de gravitación universal de Newton:

$$F = G\frac{Mm}{r^2}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

G es la **constante de gravitación universal**. Su valor es $6{,}67 \times 10^{-11}$ N m^2 kg^{-2} y figura en el *Apéndice de datos de Física*. Su reducido valor refleja el hecho de que las fuerzas gravitatorias son pequeñas a menos que una masa, o las dos, sean muy grandes. G es una constante *fundamental* que, hasta donde sabemos, siempre tiene exactamente el mismo valor en todo el universo. No se debe confundir con g, la aceleración originada por la gravedad, que varía con la ubicación. La relación entre g y G la explicaremos más tarde en este capítulo.

En la Figura 6.19 se muestra la relación entre la fuerza y la distancia. Observemos que sobre *ambas* masas actúa siempre exactamente la misma fuerza (pero en sentidos opuestos), incluso aunque una masa sea más grande que la otra. Este es un ejemplo de la tercera ley del movimiento de Newton.

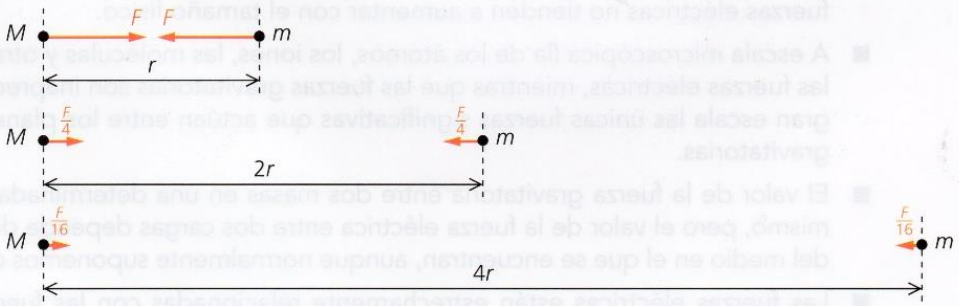


Figura 6.19
La fuerza gravitatoria entre dos masas puntuales M *y* m *disminuye conforme aumenta la distancia que las separa (los vectores no están dibujados a escala)*

Sabemos que la masa de un objeto no se concentra toda en un solo punto, pero esto no significa que la ecuación de Newton no se pueda aplicar a masas reales. Las fuerzas entre dos masas esféricas de densidad uniforme que se encuentran muy separadas entre sí equivalen a las fuerzas entre esas mismas esferas con toda la masa concentrada en sus centros. El campo gravitatorio alrededor de un planeta (esférico) es, de hecho, el mismo que crearía una masa similar concentrada en el centro del planeta.

Ejemplo resuelto

8 Calcula la fuerza gravitatoria que actúa entre la Tierra y un libro de 1,0 kg situado sobre la superficie de la Tierra. (La masa de la Tierra es $6{,}0 \times 10^{24}$ kg y su radio es $6{,}4 \times 10^{6}$ m).)

$$F = G\frac{Mm}{r^2}$$

$$F = (6{,}67 \times 10^{-11}) \times \frac{1{,}0 \times (6{,}0 \times 10^{24})}{(6{,}4 \times 10^{6})^2}$$

$$F = 9{,}8\,\text{N}$$

Este es el *peso* de una masa de 1,0 kg sobre la superficie de la Tierra. El libro atrae a la Tierra con una fuerza del mismo valor que, por supuesto, tiene un efecto inapreciable sobre la Tierra. Este es un ejemplo de la tercera ley de Newton.

19 Estima la fuerza gravitatoria que hay entre tú y tu lápiz, que se encuentra a una distancia de 1 m.

20 ¿Cuál es la fuerza gravitatoria entre dos esferas de acero, cada una con un radio de 45 cm, que están separadas 10 cm? (La densidad del acero es 7 900 kg m^{-3}).

21 Calcula la fuerza gravitatoria media entre la Tierra y el Sol. (Para efectuar el cálculo tendrás que buscar los datos necesarios).

22 Un protón tiene una masa de $1{,}7 \times 10^{-27}$ kg y la masa de un electrón es $9{,}1 \times 10^{-31}$ kg. Estima la fuerza gravitatoria entre estas dos partículas en un átomo de hidrógeno si asumimos que se encuentran separadas una distancia de $5{,}3 \times 10^{-11}$ m.

Semejanzas y diferencias entre las fuerzas eléctricas y las fuerzas gravitatorias

Si comparamos la ley de gravitación de Newton con la ley de Coulomb (página 206), observaremos que hay notables similitudes. Las dos leyes describen fuerzas que actúan en el espacio entre dos puntos: la primera, las fuerzas gravitatorias entre masas, y la segunda, las fuerzas eléctricas entre cargas.

Las leyes de Newton y Coulomb se aplican a fuerzas que se extienden radialmente por el espacio, por lo que no es de extrañar que las dos ecuaciones sean similares (leyes del inverso del cuadrado). Pero es obvio que también hay diferencias entre las fuerzas eléctricas y las fuerzas gravitatorias:

- La fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales aisladas es muchísimo mayor que la fuerza gravitatoria entre dos masas puntuales aisladas y separadas por la misma distancia. La comparación del valor de las dos constantes en las ecuaciones demuestra esta diferencia.
- Hasta donde sabemos solo hay un tipo de masa, pero hay dos tipos de cargas; también parece que no existe ningún tipo de fuerza gravitatoria repulsiva entre las masas.
- A medida que aumentan las masas, también lo hacen las fuerzas gravitatorias que actúan entre ellas. Sin embargo, aunque los objetos aumenten de tamaño, normalmente sigue habiendo (aproximadamente) el mismo número de partículas con carga positiva y negativa, por lo que las fuerzas eléctricas no tienden a aumentar con el tamaño físico.
- A escala microscópica (la de los átomos, los iones, las moléculas y otras partículas) predominan las fuerzas eléctricas, mientras que las fuerzas gravitatorias son inapreciables. Por el contrario, a gran escala las únicas fuerzas significativas que actúan entre los planetas y las estrellas son las gravitatorias.
- El valor de la fuerza gravitatoria entre dos masas en una determinada posición siempre será el mismo, pero el valor de la fuerza eléctrica entre dos cargas depende de la permitividad eléctrica del medio en el que se encuentran, aunque normalmente suponemos que es el aire o el vacío.
- Las fuerzas eléctricas están estrechamente relacionadas con las fuerzas magnéticas, hasta el punto de que se denominan conjuntamente fuerzas electromagnéticas. La fuerza electromagnética y la fuerza gravitatoria son dos de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza (véase la página 290).

Campos gravitatorios

En el Capítulo 5 hemos visto que donde una carga experimenta una fuerza existe un campo eléctrico, y donde una carga en movimiento (una corriente eléctrica) experimenta una fuerza existe un campo magnético. Los campos gravitatorios se describen de forma análoga.

Se denomina **campo gravitatorio** a la zona (alrededor de una masa) en la que otra masa puede experimentar una fuerza gravitatoria. Nosotros vivimos en el campo gravitatorio de la Tierra, mientras que la Tierra se mueve en el campo gravitatorio del Sol. Las fuerzas gravitatorias pueden ser muy reducidas si las masas son pequeñas o están muy separadas, en cuyo caso los campos puede ser totalmente insignificantes aunque, en teoría, nunca llegan a anularse.

Cuando queremos representar un campo gravitatorio en un papel o en una pantalla, lo podemos hacer con **líneas de campo** gravitatorias, tal como se muestra en la Figura 6.20 y se ha explicado anteriormente para los campos magnéticos. Las líneas y arcos muestran la dirección y el sentido de la fuerza gravitatoria que experimentaría una masa colocada en un lugar determinado del campo. La Figura 6.20a representa cómo se distribuyen las líneas del **campo gravitatorio radial** alrededor de la Tierra.

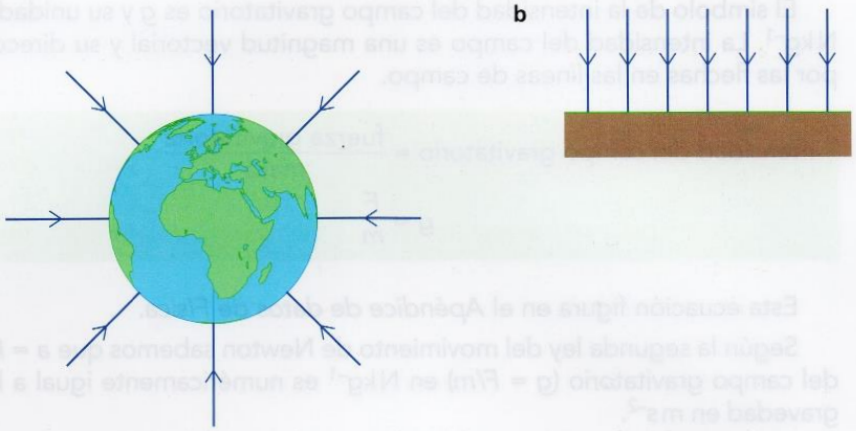


Figura 6.20
Las líneas de campo se usan para representar campos gravitatorios en el papel o en la pantalla: **a** *campo radial;* **b** *campo uniforme*

Las líneas están más próximas entre sí cuanto más cerca están de la Tierra, lo que significa que la intensidad del campo es mayor. Las líneas de campo nunca se cruzan, ya que significaría que la fuerza gravitatoria estaría actuando en dos direcciones distintas en el mismo lugar. Las líneas paralelas de la Figura 6.20b representan un **campo gravitatorio uniforme**, como el que hay en una pequeña región de la superficie de la Tierra en la que las variaciones en el campo son despreciables.

Enlace con la teoría del conocimiento

Campos

El hecho de que una masa pueda influir en otra masa sin que haya ningún contacto ni suceda nada más entre ellas es difícil de entender y explicar: ¿cómo puede una masa «saber» que hay otra masa que le influye cuando no hay ninguna conexión entre ellas? (Esto es lo que en ocasiones se conoce como «acción a distancia»). Se pueden hacer afirmaciones similares sobre las fuerzas entre cargas eléctricas. A este enigma se podría añadir que el movimiento de una masa y el efecto gravitatorio de ese movimiento en cualquier otro sitio parecen totalmente simultáneos.

Al asignar un nombre a la fuerza (por ejemplo, «fuerza gravitatoria») y denominar «campo» al espacio en el que se puede detectar dicha fuerza, podemos pensar que lo entendemos mejor pero ¿es eso cierto?

Como siempre, la utilidad real de la física consiste en hacer cálculos y predicciones, y la ley de Newton y la ley de Coulomb son realmente útiles en ese sentido. Estas leyes predicen que los campos que describen se amplían indefinidamente, aunque en la práctica las fuerzas se vuelven más pequeñas hasta hacerse inmensurables si las distancias implicadas son muy grandes.

La teoría de la relatividad general de Einstein ofrece una interpretación diferente de la fuerza y el campo gravitatorios desde el punto de vista de la curvatura del espacio-tiempo, pero esto no resta importancia ni a la ley de gravitación universal de Newton ni a cualquiera de las leyes del movimiento de Newton. La física cuántica ha desplazado el concepto de campo eléctrico, y en su lugar se basa en la idea de que son las partículas virtuales las que originan las fuerzas.

Hay determinados fenómenos en física para los que no parece haber una explicación más sencilla y puede tentarnos la idea de creer que «el universo es así» para no profundizar más. Sin embargo, uno de los objetivos de la física es la búsqueda de las «verdades» fundamentales.

El estudio de las fuerzas gravitatoria, electromagnética y nuclear, así como los campos que usamos para describirlas, es una de las principales funciones de la física, porque estas fuerzas han generado el mundo y el universo que vemos a nuestro alrededor. La búsqueda de semejanzas entre estas fuerzas y los campos fundamentales ha sido durante mucho tiempo objeto de estudio para los físicos que intentan desarrollar el concepto de una sola fuerza unificada.

Intensidad del campo gravitatorio

Es posible que nos planteemos la pregunta siguiente: «si se coloca una masa en un lugar concreto, ¿cuál es la fuerza gravitatoria que actúa sobre ella?» La respuesta, sin duda alguna, depende de la magnitud de la masa, por lo que es más útil generalizar y preguntarnos: «¿cuál es la fuerza que actúa sobre una unidad de masa (1 kg)?» Si sabemos la respuesta, entonces podemos calcular fácilmente la fuerza gravitatoria que actúa sobre cualquier otra masa.

La **intensidad del campo gravitatorio** se define como la fuerza por unidad de masa que experimenta una masa de prueba pequeña colocada en ese punto.

Se hace referencia a una «**masa de prueba** pequeña» porque una masa grande (en comparación con la masa que crea el campo original) tendría su propio campo gravitatorio significativo.

El símbolo de la intensidad del campo gravitatorio es g y su unidad los newtons por kilogramo, $N\,kg^{-1}$. La intensidad del campo es una magnitud vectorial y su dirección y sentido vienen dados por las flechas en las líneas de campo.

$$\text{intensidad del campo gravitatorio} = \frac{\text{fuerza gravitatoria}}{\text{masa}}$$

$$g = \frac{F}{m}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Según la segunda ley del movimiento de Newton sabemos que $a = F/m$, por lo que la intensidad del campo gravitatorio ($g = F/m$) en $N\,kg^{-1}$ es numéricamente igual a la aceleración que origina la gravedad en $m\,s^{-2}$.

Imagina que estás en un planeta desconocido y quieres determinar de forma experimental la intensidad del campo gravitatorio. Lo podrías hacer fácilmente colgando una «pequeña» masa de prueba de 1 kg de un dinamómetro. La lectura que obtendrías sería la intensidad del campo gravitatorio (en $N\,kg^{-1}$), la dirección sería la propia de la cuerda y el sentido sería «hacia abajo», hacia el centro del planeta.

La ecuación $g = F/m$ es comparable a $E = F/q$ y $B = F/IL \operatorname{sen}\theta$, cada una de las cuales define la intensidad de los campos de fuerza fundamentales.

Intensidad del campo gravitatorio alrededor de un planeta

Como la fuerza gravitatoria es $F = GMm/r^2$, la intensidad del campo gravitatorio g alrededor de una masa puntual M se puede calcular a partir de G si sustituimos F en la ecuación $g = F/m$. Si m es una masa de prueba situada a una distancia r de una masa M, entonces:

$$g = \frac{GMm/r^2}{m}$$

$$g = G\frac{M}{r^2}$$

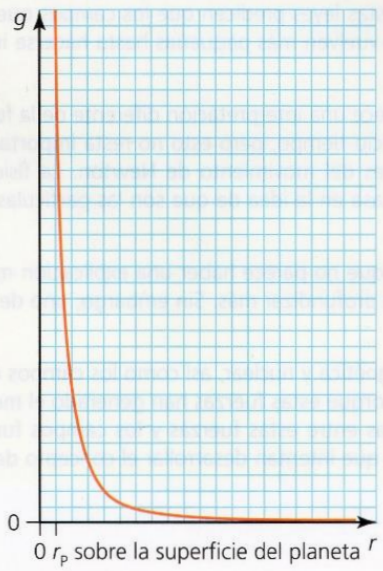


Figura 6.21
La intensidad del campo gravitatorio de un planeta, g, disminuye con la distancia al centro del planeta, r, y es inversamente proporcional al cuadrado de dicha distancia

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*. Aunque se ha deducido para una masa puntual, también se puede usar para determinar el campo gravitatorio sobre la superficie de una masa esférica como un planeta o un satélite natural, o fuera de ella. Para determinar el campo sobre la superficie de un planeta, sustituimos r por r_p, el radio del planeta. Podemos usar una densidad media para calcular la masa, pero debemos asumir que la masa está concentrada en el centro de la esfera. Al igual que la fuerza gravitatoria, la intensidad del campo gravitatorio, g, sigue la ley del inverso del cuadrado de la distancia, que es lo que se ha representado en la Figura 6.21.

Para determinar la dependencia de la intensidad del campo gravitatorio respecto al radio del planeta, nos debemos basar en estos hechos:

- la masa, M, es igual a la densidad, ρ, multiplicada por el volumen, V
- el volumen de una esfera es igual a $\frac{4}{3}\pi r^3$

De este modo, podemos afirmar que:

$$M = \rho\frac{4}{3}\pi r_P{}^3$$

La densidad de un planeta no es uniforme, por lo que el valor que se usa aquí es un valor medio. Sustituyendo este valor de M en la ecuación de g, obtenemos:

$$g = G\rho\frac{4}{3}\pi\frac{(r_P{}^3)}{(r_P{}^2)}$$

Por lo tanto:

$$g = \frac{4}{3}G\pi\rho r_P$$

Esta ecuación predice que la intensidad del campo gravitatorio sobre la superficie de un planeta es proporcional a su radio. *No* figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Según la ecuación podemos deducir que los planetas más grandes generan campos más intensos, pero esto solo es cierto si tienen densidades medias iguales. (La Tierra es el planeta más denso de nuestro sistema solar, con una densidad media de 5510 kg m^{-3}. Venus y Mercurio tienen densidades similares a la Tierra, pero la densidad de Marte es significativamente menor. Los planetas más exteriores son gaseosos y cuentan con densidades menores. De estos, Saturno es el que menos densidad tiene, con 687 kg m^{-3}).

Ejemplo resuelto

9 **a** Calcula la intensidad del campo gravitatorio sobre la superficie de la Luna sabiendo que la masa de la Luna es de $7{,}35 \times 10^{22}$ kg y su radio de 1740 km.

b Calcula la intensidad del campo gravitatorio en un punto sobre la superficie de la Tierra debido a la Luna (no a la Tierra) si asumimos que la distancia entre el centro de la Luna y la superficie de la Tierra es $3{,}8 \times 10^8$ m.

c Calcula la intensidad del campo gravitatorio sobre la superficie del planeta Venus (radio = 6050 km, densidad media = $5{,}2 \times 10^3$ kg m^{-3}).

a $g = \frac{GM}{r^2}$

$$g = \frac{(6{,}67 \times 10^{-11}) \times (7{,}35 \times 10^{22})}{(1{,}74 \times 10^6)^2}$$

$g = 1{,}62\,N\,kg^{-1}$ (este resultado es aproximadamente un sexto de la intensidad del campo gravitatorio de la Tierra).

b $g = \frac{GM}{r^2}$

$$g = \frac{(6{,}67 \times 10^{-11}) \times (7{,}35 \times 10^{22})}{(3{,}8 \times 10^8)^2}$$

$g = 3{,}4 \times 10^{-5}\,N\,kg^{-1}$

Este resultado nos muestra que el campo gravitatorio debido a la Luna sobre la superficie de la Tierra es aproximadamente 300 000 veces más débil que el que origina la Tierra. A pesar de ser mucho más débil tiene algunos efectos sobre la Tierra, como las mareas.

c $g = \frac{4}{3}G\pi\rho r_P$

$$g = \frac{4}{3} \times (6{,}67 \times 10^{-11}) \times \pi \times (5{,}2 \times 10^3) \times (6{,}05 \times 10^6)$$

$g = 8{,}8\,N\,kg^{-1}$

23 El radio del planeta Mercurio es 2440 km y su masa $3{,}3 \times 10^{23}$ kg. Calcula la intensidad del campo gravitatorio sobre su superficie.

24 **a** ¿Cuál es la intensidad del campo gravitatorio a una altura de 300 km sobre la superficie de la Tierra sabiendo que su radio es $6{,}4 \times 10^6$ m? Muchos satélites orbitan aproximadamente a esa altura.

b ¿Qué porcentaje supone el resultado anterior respecto al valor aceptado para la intensidad del campo gravitatorio sobre la superficie de la Tierra?

25 Calcula la intensidad del campo gravitatorio sobre la superficie de un planeta que tiene un radio de 8560 km y una densidad media de 4320 kg m^{-3}.

26 ¿Cuál sería la intensidad del campo gravitatorio en un planeta cuyo radio fuera el doble que el de la Tierra y su densidad la mitad?

27 Usa una hoja de cálculo para efectuar operaciones con datos y dibujar una gráfica que muestre cómo varía la intensidad del campo gravitatorio de la Tierra desde su superficie hasta una altura de 50 000 km.

28 **a** Averigua el nombre y obtén información sobre el satélite natural más grande de nuestro sistema solar y el planeta alrededor del cual orbita.

b Calcula la intensidad del campo gravitatorio sobre su superficie.

Perspectivas adicionales

Pesar la Tierra

En la época en que Newton propuso su ley de gravitación universal no era posible determinar el valor exacto de la constante de gravitación, G. Las únicas fuerzas gravitatorias que se podían medir eran las de los pesos de determinadas masas sobre la superficie de la Tierra. Se conocía el radio de la Tierra, pero todavía se desconocían dos valores de la ecuación $F = GMm/r^2$: la constante de gravitación y la masa de la Tierra. Si se averiguaba una de las dos, la otra se podía calcular a partir de la ley de gravitación de Newton. Ese es el motivo por el que la determinación del valor exacto de G se conoce como «pesar la Tierra».

Sin duda, en el siglo XVII era posible calcular el valor aproximado de la masa de la Tierra a partir de su volumen y su densidad media estimada (usando $m = \rho V$). Pero las estimaciones de la densidad no habrían sido más que una hipótesis fundamentada. Ahora sabemos que la corteza de la Tierra tiene una densidad media mucho menor (aproximadamente 3000 kg m^{-3}) que el resto del interior del planeta. Sin embargo, era posible usar la masa estimada de la Tierra para calcular el valor aproximado de la constante de gravitación. La primera medida exacta la obtuvo más de un siglo después el británico Cavendish en un experimento que es famoso por su precisión y exactitud.

El cálculo del valor de G sin la necesidad de conocer el valor de la masa de la Tierra (o la Luna, o cualquier planeta) exigía la medida directa de la fuerza entre dos masas conocidas. Cavendish usó esferas de plomo (véase la Figura 6.22) por su elevada densidad (11,3 g cm^{-3}). Es difícil calcular las fuerzas que actúan porque son demasiado pequeñas, y además porque pueden aparecer fuerzas de tamaño similar según distintos factores ambientales. (De hecho, el principal objetivo de Cavendish no era medir G sino obtener el valor de la densidad de la Tierra).

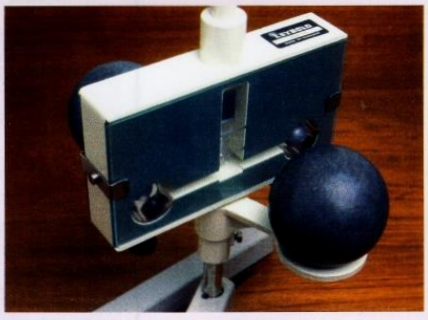


Figura 6.22
Una versión moderna del aparato de Cavendish

1 **a** Calcula las fuerzas gravitatorias entre dos esferas idénticas de plomo de 4,0 kg cuyos centros están separados 10 cm.

b ¿Cuál es la distancia entre las superficies de las esferas?

c Estima el peso de un grano de sal y compara tu respuesta con la fuerza gravitatoria que has calculado en **a**.

2 En un primer intento para determinar la constante de gravitación y calcular el valor de la masa de la Tierra, los péndulos se suspendían cerca de montañas (véase una representación exagerada en la Figura 6.23).

a ¿Qué medidas se deberían haber llevado a cabo?

b Sugiere por qué era improbable que estos experimentos fueran muy precisos.

c Busca información sobre Nevil Maskelyne y un monte de Escocia.

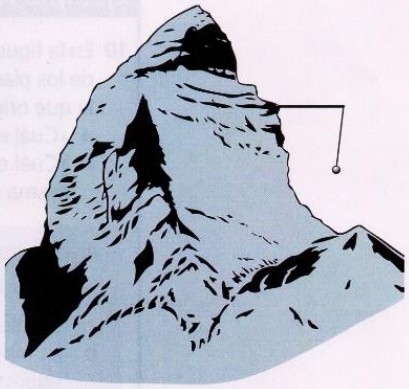


Figura 6.23
Un péndulo y una montaña se atraen entre sí

Cálculo de las intensidades de campos gravitatorios combinados de planetas y/o satélites naturales

Es posible que una masa esté sometida a dos o más campos gravitatorios distintos. Por ejemplo, nosotros estamos bajo la influencia de los campos de la Tierra y de la Luna. Sin embargo, los valores que hemos calculado en el Ejercicio resuelto 9 demostraban que sobre la superficie de la Tierra la relación entre ambos campos es $9{,}81/(3{,}4 \times 10^{-5})$, o aproximadamente 300 000:1. Es decir, sobre la superficie de la Tierra, el campo gravitatorio de la Luna es casi despreciable en comparación con el campo de la Tierra. Sin embargo, si una nave espacial viaja de la Tierra hasta la Luna, el campo gravitatorio que origina la Tierra se va debilitando, mientras que el campo de la Luna cada vez se va haciendo más intenso. Habrá un punto en el que los dos campos tendrán la misma intensidad pero sentidos opuestos (el punto P en la Figura 6.24).



Figura 6.24
Los campos opuestos se anulan en un punto determinado, P, entre la Tierra y la Luna

En P la intensidad total del campo gravitatorio es cero y no habrá ninguna fuerza resultante que actúe sobre la nave espacial, porque las fuerzas de atracción de la Luna y la Tierra son iguales y opuestas. Cuando la nave viaja de la Tierra hacia P, hay una fuerza resultante que la atrae hacia la Tierra, pero que se va reduciendo en intensidad. En el momento en que la nave atraviesa el punto P, habrá una fuerza resultante cada vez mayor que la atrae hacia la Luna.

En general, si dos o más masas crean un campo gravitatorio en un punto determinado, el campo total se calcula sumando los campos individuales, teniendo en cuenta que son *magnitudes vectoriales*.

En este capítulo solo trataremos las ubicaciones en puntos situados en una línea que atraviesa dos masas, por lo que la suma vectorial de los dos campos es directa, tal y como veremos en el Ejemplo resuelto 10.

Ejemplo resuelto

10 En la figura 6.25 (que no está a escala), P es el punto medio de la línea que une los centros de los planetas A y B. En P la intensidad del campo gravitatorio debido a A es 4,0 N kg^{-1} y la que origina B es 3,0 N kg^{-1}.

a ¿Cuál es la intensidad del campo gravitatorio total en P?

b ¿Cuál es la intensidad del campo gravitatorio combinado en el punto Q, que está a la misma distancia de A que P?

a Si consideramos que el campo hacia la parte inferior del diagrama es positivo:

$$-4{,}0 + 3{,}0 = -1{,}0$$

La intensidad del campo gravitatorio es 1,0 N kg^{-1} hacia A.

b La magnitud del campo debido a A es la misma en Q que en P, pero en sentido opuesto. La intensidad del campo debido a B en Q es 3^2 veces menor que en P porque está tres veces más alejado, aunque en la misma dirección.

$$4{,}0 + \left(\frac{3{,}0}{9}\right) = 4{,}3 \text{ N kg}^{-1} \text{ hacia A y B.}$$

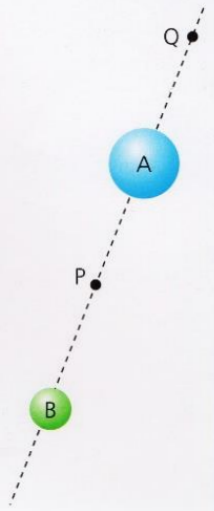


Figura 6.25

29 **a** Busca datos que te permitan elaborar una hoja de cálculo para calcular las intensidades de los campos gravitatorios originados por la Tierra y la Luna en distintos puntos a lo largo de una línea recta que une sus superficies.
b Combina los campos para determinar el campo resultante y dibuja una gráfica con los resultados.
c ¿Dónde es igual a cero el campo gravitatorio resultante?

30 Los campos gravitatorios del Sol y la Luna provocan las mareas de los océanos de nuestro planeta. Las mareas más altas tienen lugar cuando el campo resultante alcanza su valor máximo (en fase de «luna nueva»). Dibuja un esquema que muestre las posiciones relativas de la Tierra, el Sol y la Luna cuando el campo resultante sobre la superficie de la Tierra es:
a el más intenso
b el más débil (en fase de «luna llena»).

31 A partir de la Figura 6.25. Si el planeta A tiene un campo gravitatorio de 15 N kg^{-1} en Q, pero el campo combinado en el mismo punto es 16 N kg^{-1}, calcula el campo combinado en el punto P.

Movimiento orbital

Las fuerzas gravitatorias entre dos masas son iguales en módulo pero tienen sentidos opuestos. Sin embargo, si una de las masas es mucho más grande que la otra, normalmente asumimos que la fuerza que ejerce sobre la de mayor tamaño tiene un efecto insignificante, mientras que si la misma fuerza actúa sobre una masa mucho más pequeña produce una aceleración significativa. Si la masa más pequeña se está moviendo, entonces la fuerza gravitatoria puede originar la fuerza centrípeta que lo mantiene en **órbita** (trayectoria que describe un objeto en torno a otro) alrededor de la masa de mayor tamaño. Se dice entonces que es un **satélite** de la masa más grande. La Tierra y el resto de planetas que describen órbitas alrededor del Sol, y los satélites naturales que lo hacen alrededor de los planetas, son ejemplos de **satélites naturales.** En el mundo actual cada vez somos más dependientes de los **satélites artificiales** en órbita alrededor de la Tierra.

Satélites artificiales alrededor de la Tierra

Si suponemos que no hay resistencia del aire, una bala que se disparara «horizontalmente» desde la cima de una montaña se mueve siguiendo una trayectoria parabólica y alcanza el suelo a cierta distancia, tal como representa la trayectoria A de la Figura 6.26. Si la bala se desplazara con la suficiente rapidez, lo haría según la trayectoria B, y «se escaparía» de la Tierra. La trayectoria C representa un objeto que se mueve con la velocidad, dirección y sentido precisos para permanecer a la misma distancia sobre la superficie de la Tierra (recuerda que estamos asumiendo que no hay resistencia del aire), es decir, el objeto está en órbita alrededor de la Tierra.

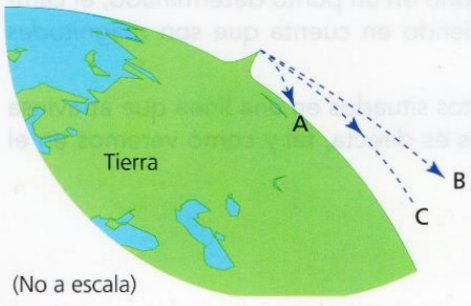


Figura 6.26
Trayectoria de objetos proyectados a diferentes velocidades desde la cima de una montaña

La gravedad es la única fuerza que actúa sobre la bala y lo hace de forma continua y perpendicular a su velocidad instantánea. Como hemos visto, esta es una condición necesaria para el movimiento circular. La fuerza de la gravedad (peso) es

la que origina la fuerza centrípeta. Si recordamos la ecuación de la aceleración centrípeta, podemos escribir:

$$\frac{v^2}{r} = g \quad \text{o} \quad \left(\frac{mv^2}{r} = mg\right)$$

Esto nos permite calcular la velocidad teórica necesaria para que alcance una órbita muy cercana a la superficie de la Tierra (radio = $6{,}37 \times 10^6$ m).

$$v^2 = gr = 9{,}81 \times (6{,}37 \times 10^6)$$

$$v = 7910\,\text{m s}^{-1}$$

Si no hubiera resistencia del aire, un objeto que se mueve horizontalmente a una velocidad de $7910\,\text{m s}^{-1}$ cerca de la superficie terrestre orbitaría alrededor de la Tierra.

Para evitar la resistencia del aire, un satélite necesita estar por encima de la atmósfera de la Tierra, por lo que mayoría de las órbitas de los satélites están a una altura mínima de 300 km. Para mantener un satélite en una órbita circular alrededor de la Tierra, es necesario suministrarle la velocidad necesaria para su altura concreta. Si no hay resistencia del aire, un satélite en una órbita circular puede seguir su trayectoria alrededor de la Tierra sin necesidad de que lleve motor. La fuerza de la gravedad actúa perpendicularmente al movimiento, de modo que esa fuerza no realiza ningún trabajo.

Si conocemos el valor de g a una altura concreta, podemos calcular la velocidad necesaria para conseguir que un satélite describa una órbita circular a esa altura. La velocidad no depende de la masa, por lo que todos los satélites que están a la misma altura se mueven con la misma velocidad y tienen el mismo periodo orbital.

Si la velocidad de un satélite es superior a la que necesita para seguir una órbita circular (pero menor que la velocidad de escape), se moverá siguiendo una trayectoria **elíptica**. Las órbitas de los planetas y de los satélites naturales o artificiales no son perfectamente circulares, pero la diferencia es a menudo insignificante.

32 **a** Calcula los valores de la intensidad del campo gravitatorio para alturas de 250 km, 1000 km, 10 000 km y 30 000 km por encima de la Tierra.
b Calcula las velocidades necesarias para las órbitas circulares a estas alturas.
c Utiliza un compás para dibujar un diagrama a escala de la Tierra con estas órbitas alrededor de ella.
d Usa la ecuación $v = 2\pi r/T$ para determinar los tiempos para las órbitas completas (periodos), T, para estas alturas y márcalos en el diagrama.

33 Dos satélites de igual masa describen órbitas alrededor del mismo planeta tal como se muestra en al Figura 6.27. La distancia del satélite B al centro del planeta es el doble que la distancia del satélite A al mismo punto. Copia la tabla y complétala para que incluya las propiedades de la órbita del satélite B.

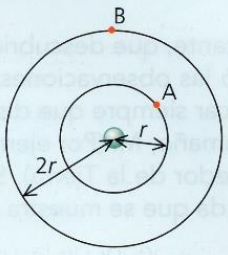


Figura 6.27

	Satélite A	Satélite B
Distancia desde el centro del planeta	r	$2r$
Intensidad del campo gravitatorio	g	
Fuerza gravitatoria	F	
Circunferencia de la órbita	c	
Velocidad	v	
Periodo	T	

34 La distancia media de la Tierra al Sol es $1{,}50 \times 10^{11}$ m.
a Calcula la velocidad orbital media de la Tierra alrededor del Sol.
b Determina la aceleración centrípeta de la Tierra hacia el Sol.
c Usa las respuestas anteriores para calcular el valor de la masa del Sol.

La gravedad controla los movimientos de los satélites naturales, los planetas, las estrellas y las galaxias

La gravedad es la única fuerza significativa que controla los movimientos de todos los objetos grandes que hay en el espacio. Aunque el movimiento circular perfecto es un ejemplo idealizado, las leyes de Newton del movimiento y la gravitación se pueden combinar con el concepto de fuerza centrípeta para hacer predicciones fiables de los movimientos de los satélites naturales, los planetas y las estrellas, así como de la rotación de las galaxias, entre otros.

Naturaleza de la ciencia

¿Pueden las leyes de la física predecir el futuro?

Newton es merecidamente famoso por formular las «leyes» del movimiento y la gravitación que llevan su nombre. Estas leyes son fundamentales en la mayoría de los estudios que engloba la «física clásica» y, al usarlas se pueden hacer predicciones de movimientos futuros a partir de observaciones actuales y anteriores. La física newtoniana se describe a menudo como **determinista**, lo que significa que una serie de circunstancias dadas solo pueden conducir a un resultado único y verdadero (un concepto que la física moderna ha demostrado que es incorrecto a escala atómica). Por ejemplo, podemos usar las leyes de Newton para predecir con gran exactitud lo que ocurrirá si chocan dos coches, o determinar cuándo se podrá ver un cometa desde la Tierra dentro de cientos de años, pero no para predecir con fiabilidad lo que sucede dentro de un átomo. Además, aunque la ley de Newton describe con precisión los eventos gravitatorios en lo que respecta a ecuaciones matemáticas, no nos resulta útil a la hora de entender la verdadera naturaleza de la gravedad.

Relación del radio medio de una órbita con su periodo

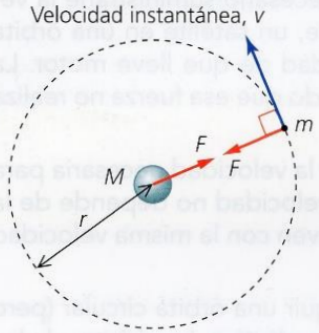


Figura 6.28

La fuerza centrípeta (mv^2/r) necesaria para mantener cualquier masa, m, en una órbita circular alrededor de una masa más grande, M, procede de la fuerza de la gravedad (GMm/r^2), que siempre actúa perpendicularmente al movimiento de la masa que describe la órbita (véase la Figura 6.28).

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{GMm}{r^2}$$

$$v^2 = \frac{GM}{r}$$

Esta ecuación es equivalente a $v^2 = gr$, que hemos usado antes en este capítulo).

Si sustituimos v por $2\pi r/T$ (circunferencia/periodo), obtenemos una ecuación relevante que demuestra directamente que el periodo de una órbita depende de su radio. Esta ecuación también se puede aplicar a las órbitas elípticas si se usa el radio medio.

$$\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2 = \frac{GM}{r}$$

Después de operar obtenemos una ecuación general que relaciona el radio con el periodo para todos los satélites que orbitan alrededor de la misma masa, M.

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$$

$GM/4\pi^2$ es una constante para todas las masas que describen una órbita alrededor de la misma masa, M.

Esto significa que r^3/T^2 también es una constante, que descubrió el matemático alemán Johannes Kepler (1571-1630, Figura 6.29). Kepler usó las observaciones y los datos de los planetas de nuestro sistema solar, pero su ley se puede aplicar siempre que distintas masas más pequeñas orbiten alrededor de una misma masa de mayor tamaño, M. (Por ejemplo, los satélites naturales alrededor de Júpiter o los satélites artificiales alrededor de la Tierra). Su ley es empírica (se basa solo en la observación, no en la teoría) y la ley derivada que se muestra arriba la propuso Isaac Newton muchos años después.

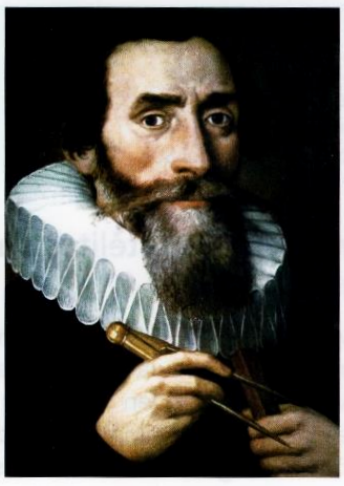


Figura 6.29
Johannes Kepler

Ejemplo resuelto

11 Ío es un satélite de Júpiter. Su distancia media al centro de Júpiter es 422 000 km y tarda 1,77 días en completar una órbita a su alrededor. Calcula la masa de Júpiter.

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$$

$$\frac{(4{,}22 \times 10^8)^3}{(1{,}77 \times 24 \times 3600)^2} = (6{,}67 \times 10^{-11})\frac{M}{4\pi^2}$$

$$M = 1{,}90 \times 10^{27}\,\text{kg}$$

Los satélites artificiales que describen órbitas alrededor de la Tierra tienen una gran variedad de usos, que aumentan año tras año. Esto requiere negociaciones y controles internacionales, es decir, una colaboración al más alto nivel que también tiene como objetivo evitar la duplicidad de los estudios y los costes. La Figura 6.30 muestra la zona de lanzamiento de cohetes de la Agencia Espacial Europea, que cuenta con veinte estados miembros.

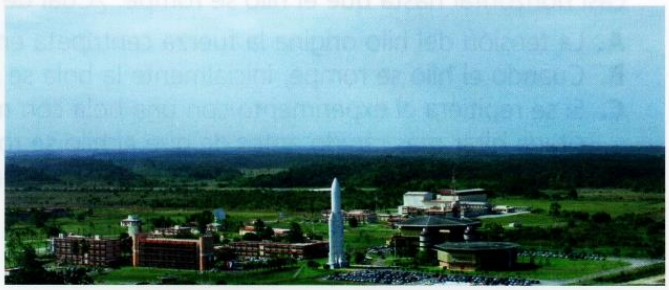


Figura 6.30
Lugar de lanzamiento de la Agencia Espacial Europea en la Guayana Francesa

35 **a** Calcula el periodo y la velocidad orbital de un satélite que describe una órbita a una distancia de tan solo 300 km sobre la superficie de la Tierra.
b Sugiere una ventaja y un inconveniente de colocar satélites a esta altura.

36 La masa del Sol es $1{,}99 \times 10^{30}$ kg. Usa la tercera ley de Kepler y el periodo de la Tierra para determinar la distancia media al Sol.

37 **a** Elabora una hoja de cálculo con los planetas del sistema solar, sus distancias medias al Sol, r, y sus periodos, T.
b Usa la hoja de cálculo para calcular r^3, T^2 y r^3/T^2.
c Usa el programa para dibujar un gráfico que compare r^3 y T^2.
d ¿Confirman tus resultados la tercera ley de Kepler? Explica la respuesta.
e También puedes dibujar un gráfico comparando log T con log r. ¿Qué se podría determinar a partir del gradiente de la curva?

38 Dos satélites naturales, A y B, describen órbitas alrededor de un planeta a distancias de $5{,}4 \times 10^7$ m y $8{,}1 \times 10^7$ m de su centro. Si el periodo del satélite A es de 24 días, calcula el periodo del satélite B.

Enlace con la teoría del conocimiento

¿Son compatibles la física clásica y la física moderna?

Las leyes de la mecánica junto con la ley de gravitación crean la naturaleza determinista de la física clásica. ¿Son compatibles la física clásica y la física moderna? ¿Hay en otras áreas del conocimiento una división parecida entre lo clásico y lo moderno en su desarrollo histórico?

¿Están los movimientos de todas las masas, desde las estrellas y las galaxias hasta las partículas subatómicas, controlados por las mismas «leyes» de la física, o es posible (o aceptable) afirmar que necesitamos físicas totalmente distintas para describir los movimientos a diferentes escalas?

Selección de preguntas de examen

Hoja 1 Preguntas del IB y preguntas tipo IB

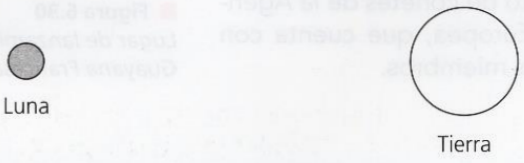
1 Un objeto que se mueve en una trayectoria circular cuyo radio mide 40 cm completa dos revoluciones en 4 s. ¿Cuál de las siguientes opciones es un cálculo exacto en lo que respecta al movimiento del objeto?

A. Su desplazamiento angular es 2π radianes.
B. Su velocidad angular media es π rad s^{-1}.
C. Su velocidad angular media es 2,5 ms^{-1}.
D. Su frecuencia es 2 Hz.

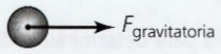
2 Se hace girar cada vez más rápido una pequeña pelota de goma colocada al final de un hilo de algodón en un círculo casi horizontal hasta que el hilo se rompe. ¿Cuál de las afirmaciones siguientes describe esta situación?

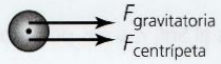
A. La tensión del hilo origina la fuerza centrípeta en la bola.
B. Cuando el hilo se rompe, inicialmente la bola se mueve radialmente hacia el exterior del centro del círculo.
C. Si se repitiera el experimento con una bola con más masa que se moviera en una trayectoria del mismo radio, necesitaría girar más rápido antes de que el hilo se rompiera.
D. Si el experimento se repitiera con la bola original moviéndose en una trayectoria de radio mayor, necesitaría girar más rápido antes de que el hilo se rompiera.

3 La Luna orbita alrededor de la Tierra.



¿Cuál de los diagramas siguientes representa correctamente la fuerza, o las fuerzas, que actúan sobre la Luna?

A. 

B. 

C. 

D. 

© IB Organization

4 ¿Cuál de las afirmaciones siguientes describe correctamente la constante G?

A. Es una magnitud vectorial.
B. Su valor es mayor sobre la Luna que sobre la Tierra.
C. Su valor es menor sobre la Luna que sobre la Tierra.
D. Es una constante fundamental.

5 Hay un lugar entre la Tierra y la Luna en el que la intensidad del campo gravitatorio es nula. Esto se debe a que:

A. El campo gravitatorio de la Tierra es más intenso que el campo gravitatorio de la Luna.
B. Los campos gravitatorios solo existen cerca de las superficies de los planetas y los satélites naturales.
C. Los campos de la Tierra y la Luna actúan en sentidos opuestos.
D. La Luna no tiene ningún campo gravitatorio.

6 La ley de gravitación universal de Newton hace referencia a la fuerza entre dos masas. Estas masas son:

A. planetas
B. estrellas
C. masas esféricas
D. masas puntuales.

7 ¿Cuál de las afirmaciones siguientes sobre un objeto que se mueve siguiendo una trayectoria circular con una velocidad lineal constante es cierta?

A. No hay ninguna fuerza que actúe.
B. Su velocidad angular aumenta uniformemente.
C. Es necesario ejercer una fuerza en la dirección del movimiento instantáneo.
D. El objeto está acelerando.

Hoja 2 Preguntas del IB y preguntas tipo IB

1 Esta pregunta está relacionada con los campos gravitatorios.

a Define la intensidad del campo gravitatorio. (2)

b La intensidad del campo gravitatorio en la superficie de Júpiter es $25\,N\,kg^{-1}$ y el radio de Júpiter es $7{,}1 \times 10^7\,m$.

i. Deduce una expresión para la intensidad del campo gravitatorio en la superficie de un planeta en función de su masa M, su radio R y la constante de gravitación G. (2)

ii. Usa la expresión que has obtenido en **b i** para estimar la masa de Júpiter. (2)

© IB Organization

2 **a** ¿Cuál es el nombre del tipo de fuerza que permite que un coche circule por una curva en una carretera horizontal? (1)

b Un coche de 1200 kg circula por una carretera que describe un arco de circunferencia de 80 m de radio. ¿Cuál es la máxima velocidad que puede alcanzar el coche si la fuerza centrípeta que actúa no puede exceder 4500 N? (3)

c Explica cómo la superficie peraltada de una carretera permite que un coche gire más rápido en una esquina que en una superficie horizontal similar. (3)

7 Física atómica, física nuclear y física de partículas

IDEAS FUNDAMENTALES

- En el mundo microscópico la energía es discreta.
- En las desintegraciones nucleares se puede liberar energía como resultado de la relación entre la masa y la energía.
- Se cree que toda la materia que nos rodea está compuesta por partículas que se denominan quarks y leptones. Se sabe que la materia tiene una estructura jerárquica en la que los quarks y leptones conforman los nucleones, los nucleones conforman los núcleos, los núcleos y los electrones conforman los átomos, y los átomos a su vez las moléculas. En esta estructura jerárquica, los quarks y los leptones son los componentes fundamentales de menor tamaño (10^{-18} m).

7.1 Energía discreta y radiactividad

En el mundo microscópico la energía es discreta

La luz es la energía electromagnética que emiten los átomos: podemos obtener mucha información sobre la energía que hay el interior de los átomos si examinamos la luz (los espectros) que emiten.

Espectros de emisión y absorción

Cuando la luz blanca procedente del sol atraviesa un prisma, se descompone en los colores que la forman. La banda de distintos colores se combina en un **espectro continuo** tal como se muestra en la Figura 4.22.



Podemos hacer que algunas sustancias *emitan* luz si les suministramos energía calentándolas. Muchos elementos emiten distintos colores que se usan para identificarlos en los *ensayos con llama*. También solemos producir luz a partir de corrientes eléctricas que suministran energía de distintas formas (véase el Capítulo 5). Si una corriente eléctrica (de alto voltaje) atraviesa un elemento, en este caso un gas a baja presión en un *tubo de descarga*, generará su propio **espectro de emisión**. Véase la Figura 7.1.



Figura 7.1
Un tubo de descarga con átomos de neón

Cuando se aplica una elevada diferencia de potencial entre los dos electrodos del tubo de descarga, la energía se transfiere a los átomos o las moléculas del gas y se emite luz. Si examinamos la luz con un **espectroscopio**, observamos que el espectro emitido no es continuo, sino que consta de un número de líneas brillantes, tal como muestra la Figura 7.2. (Se puede fabricar un sencillo espectroscopio de mano con un tubo negro que tenga una rendija y una *rejilla de difracción*; véase la página 397).

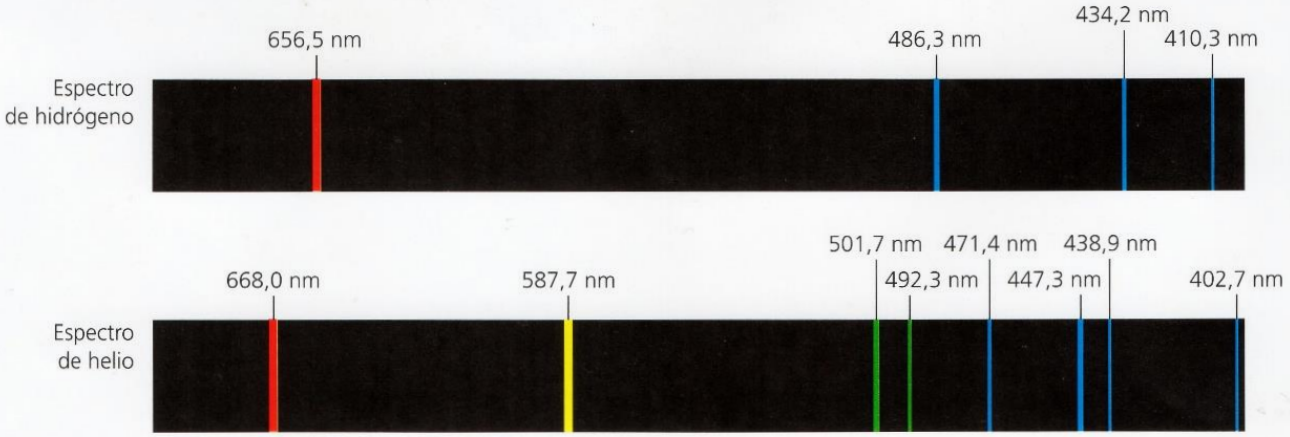


Figura 7.2 *Emisión de espectros de hidrógeno y helio*

El espectro que genera el elemento gaseoso en el tubo de descarga se conoce con el nombre de **espectro de líneas** y consiste en diversos colores *discretos* (separados), cada uno de los cuales corresponde a la imagen de la rendija situada frente a la fuente de luz. El intervalo de longitudes de onda que corresponde a las líneas del espectro de emisión es característico, y único, del elemento que hay en el tubo de descarga. Si analizamos el espectro de una luz blanca de amplio espectro que atraviesa una muestra de átomos o moléculas gaseosos mantenidos a baja presión, observaremos que *falta* la luz de determinadas longitudes de ondas. En su lugar hay una serie de líneas negras muy marcadas. Este patrón de líneas es idéntico al que hemos visto en el espectro de emisión del mismo gas y se denomina **espectro de absorción**.

En la Figura 7.3 se compara la emisión de los espectros de emisión y absorción del mismo elemento, y la forma en que se pueden observar si se usa un prisma (podemos reemplazar el prisma por una rejilla de difracción, como explicamos en el Capítulo 9)

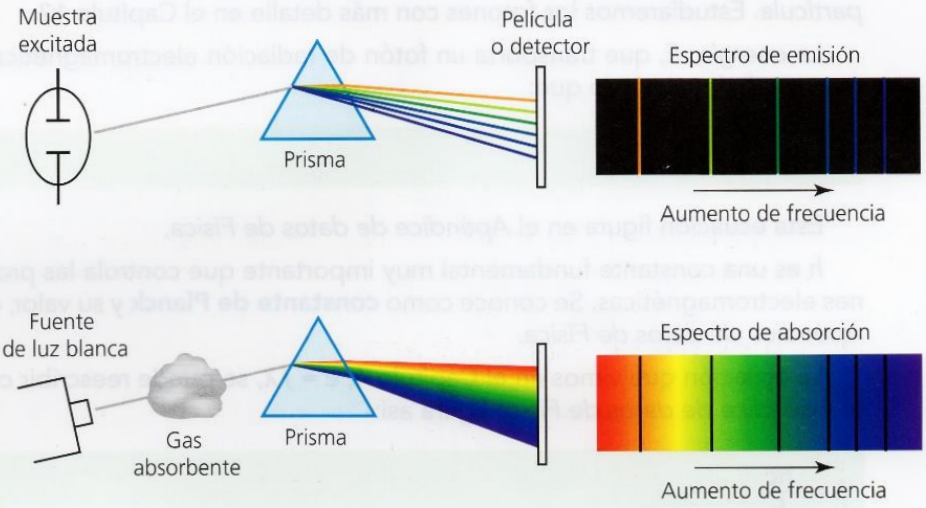


Figura 7.3
Producción de espectros de emisión y absorción del mismo elemento

Al estudio de los espectros se le denomina **espectroscopia,** y los instrumentos que se usan para medir las longitudes de onda de los espectros se conocen como *espectrómetros* (véase la Figura 7.4).



Figura 7.4
Un espectrómetro

Energía discreta y niveles de energía discreta

Fotones

Antes de explicar el origen de los espectros de líneas debes entender un concepto realmente importante en física: todas las radiaciones electromagnéticas, incluida la luz, transfieren energía en cantidades *discretas* (separadas) que se denominan **fotones**. Esta transferencia de energía no es continua. En términos más generales, usamos el término **cuanto** para describir la mínima cantidad posible de cualquier entidad que solo puede tener valores discretos. Podemos afirmar que la luz está **cuantizada**.

El hecho de que la luz pueda comportarse como si fuera «grumosa», como si estuviera compuesta de «partículas», contradice la *teoría ondulatoria de la luz* en la que nos hemos basado para explicar la difracción y la interferencia en el Capítulo 4. Cabe destacar que no hay una única teoría de la luz que explique todas sus propiedades, y a este dilema se le conoce como *dualidad onda-partícula*. Estudiaremos los fotones con más detalle en el Capítulo 12.

La energía, E, que transporta un fotón de radiación electromagnética depende solo de su frecuencia, f, de tal modo que:

$$E = hf$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

h es una constante fundamental muy importante que controla las propiedades de las radiaciones electromagnéticas. Se conoce como **constante de Planck** y su valor, $6{,}63 \times 10^{-34}$ J, figura en el *Apéndice de datos de Física*.

La ecuación que vimos en el Capítulo 4, $c = f\lambda$, se puede reescribir como $E = hc/\lambda$, aunque en el *Apéndice de datos de Física* figura así:

$$\lambda = \frac{hc}{E}$$

Ejemplo resuelto

1 Calcula la energía que transporta un fotón de microondas con una longitud de onda de 10 cm (como el de un teléfono móvil):
a en J
b en eV.

a $E = \dfrac{hc}{\lambda}$

$E = 6{,}63 \times 10^{-34} \times \dfrac{3{,}00 \times 10^{8}}{0{,}10}$

$E = 2{,}0 \times 10^{-24}$ J

b $\dfrac{2{,}0 \times 10^{-24}}{1{,}6 \times 10^{-19}} = 1{,}2 \times 10^{-5}$ eV

1 **a** ¿Qué frecuencia de radiación electromagnética tiene fotones con una energía de $1{,}0 \times 10^{5}$ eV?
b ¿Qué nombre asignamos a ese tipo de radiación?

2 Un horno microondas usa fotones electromagnéticos de energía $1{,}6 \times 10^{-24}$ J. ¿Cuál es la longitud de onda de esta radiación?

3 El dióxido de carbono de los gases de efecto invernadero absorbe radiación que tiene una frecuencia de 1 600 nm.
a ¿Cuánta energía transportan los fotones absorbidos?
b ¿En qué parte del espectro electromagnético se encuentra esta radiación?

4 Una determinada línea visible del espectro del oxígeno tiene una longitud de onda de $5{,}13 \times 10^{-7}$ m. ¿Cuánta energía transfiere un fotón de esta radiación?

5 Una bombilla emite luz con una potencia de 4 W. Estima el número de fotones que se emiten por segundo.

6 La longitud de onda habitual de la luz es 5×10^{-7} m, y la de los rayos X es 5×10^{-11} m.
a Dibuja un cuadrado pequeño de 2 mm de lado para representar la energía que transporta un fotón de luz.
b Si suponemos que su área representa la energía del fotón, dibuja otro cuadrado que represente la energía que transporta un fotón de rayos X.
c Explica por qué los rayos X son más peligrosos que la luz.

Transiciones entre niveles de energía

La emisión de un fotón de luz libera energía de un átomo, lo que significa que la cantidad de energía dentro del átomo disminuye. El hecho de que los espectros de los elementos se dispongan en forma de líneas separadas nos indica que la energía solo se puede emitir (como fotones) a partir de átomos en cantidades definidas y *discretas*. Podemos llegar a la conclusión de que la emisión de cada fotón tiene lugar cuando un átomo cambia de un *nivel de energía* determinado a otro nivel de energía también determinado, pero menor, que es lo que conocemos como *transiciones* entre niveles de energía.

La emisión de fotones de diferentes energías de átomos del mismo elemento permite deducir que cada átomo tiene muchos niveles de energía posibles. En el ejemplo simplificado de la Figura 7.5, podemos observar cómo un átomo con cuatro niveles distintos de energía puede tener seis transiciones posibles entre los niveles de energía y que, por lo tanto, los átomos con estos niveles de energía pueden emitir fotones de seis energías diferentes (longitudes de onda).

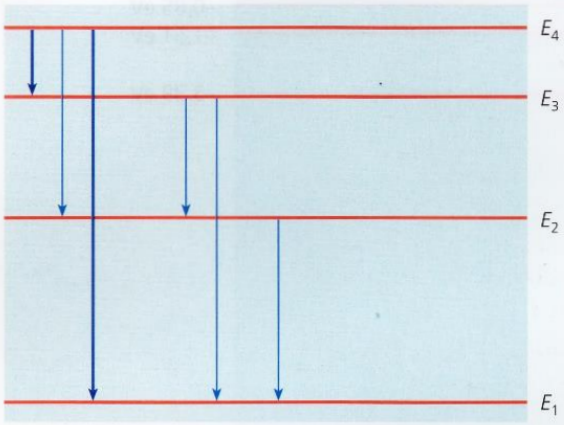


Figura 7.5
Transiciones de energía entre cuatro niveles de energía en un átomo

Cada transición tiene como resultado la emisión de un fotón con una determinada longitud de onda. La transición de E_4 a E_1 implica la máxima cantidad de energía, y por lo tanto, el resultado es una luz con la frecuencia más alta y la longitud de onda más corta. La transición de E_4 a E_3, que implica la mínima energía, emite luz con la frecuencia más baja y la longitud de onda más larga. En general, si hay una diferencia de energía, ΔE, entre los dos niveles, entonces la frecuencia, f, de un fotón implicado en una transición entre estos dos niveles viene dada por la siguiente fórmula:

$$\Delta E = hf$$

El mínimo nivel de energía posible se denomina **estado fundamental** del átomo y es, lógicamente, el nivel más bajo que se muestra en el diagrama. Los átomos se encuentran normalmente en su estado fundamental y es necesario *excitarlos* (suministrarles energía), bien mediante calor, o bien mediante una corriente eléctrica, para elevarlos a un nivel superior de energía que se denomina **estado excitado**. Posteriormente el átomo por lo general vuelve rápidamente a su nivel de energía más bajo emitiendo un fotón.

Los diferentes niveles energéticos de los átomos se explican por los cambios en la disposición de los electrones alrededor del núcleo, de modo que también se suele hacer referencia a los niveles de energía del átomo como *niveles de energía de los electrones*.

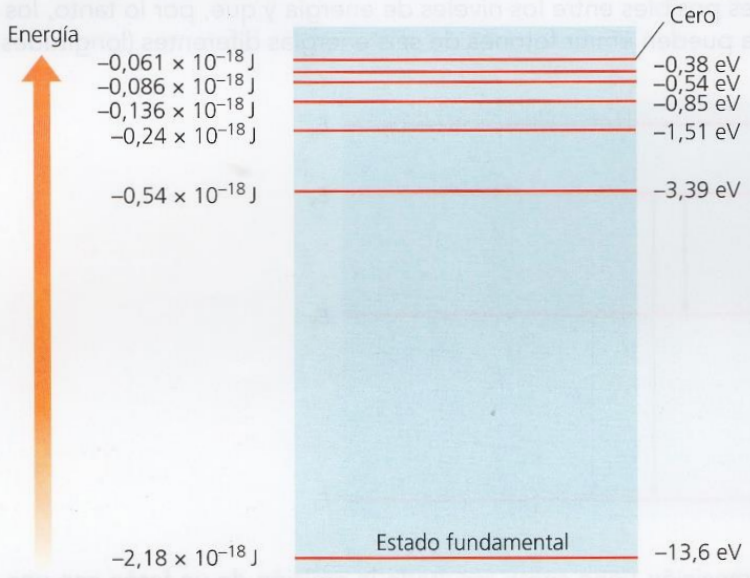
Cuando un átomo absorbe energía, su energía potencial eléctrica aumenta debido a las fuerzas de interacción entre el núcleo, cargado positivamente, y los electrones, con carga negativa. Cuando se emite un fotón, la energía potencial eléctrica disminuye.

Podemos explicar los espectros de absorción de la manera siguiente: los átomos alcanzan niveles energéticos superiores mediante la absorción de fotones con la misma energía que los que emite el propio átomo cuando experimenta una transición entre los mismos niveles energéticos. El átomo volverá a emitir rápidamente un fotón, pero en una dirección aleatoria, y por lo tanto se reducirá la intensidad de la radiación que se desplaza en la dirección original.

Los átomos de elementos distintos tienen a su vez distintos niveles energéticos. Esto supone que las diferencias entre los niveles de energía son únicas para cada elemento, por lo que cada elemento (en estado gaseoso) genera un espectro distinto y característico. Estos espectros se pueden usar para identificar la presencia de un elemento concreto en una muestra que se ha vaporizado. El análisis de la luz que emiten las estrellas se usa para determinar los elementos que contienen (este análisis se estudia con más detalle en la Opción D: Astrofísica).

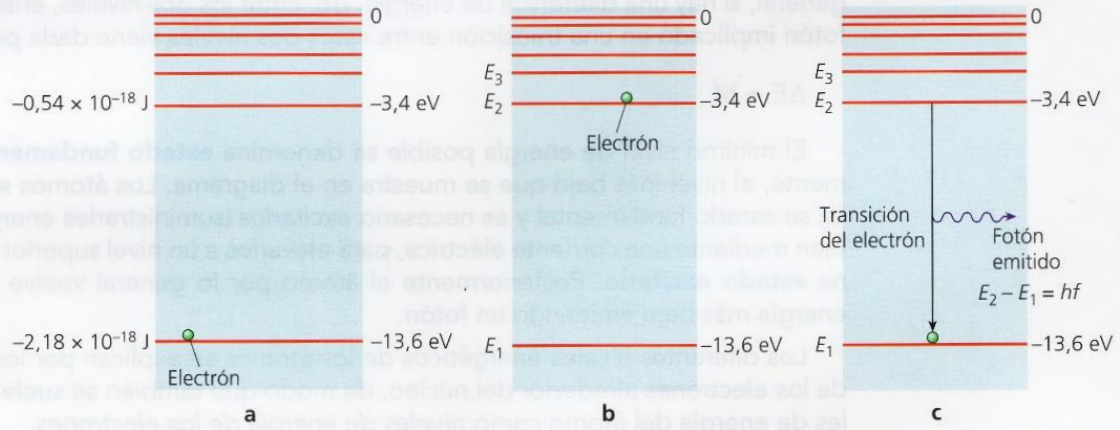
La medida de las diversas longitudes de onda de las líneas espectrales de un elemento (con un espectrómetro) se puede usar para determinar las magnitudes del elevado número de transiciones de nivel de energía que tienen lugar dentro de los átomos. A partir de esta información se puede crear un diagrama detallado de niveles de energía. En la Figura 7.6 se muestran los niveles de energía dentro del átomo de hidrógeno, que es el más sencillo. Observemos que todos los niveles tienen valores negativos, lo que indica que se debe *suministrar* energía al átomo para elevar un electrón a un nivel más alto de energía potencial y que se considera que la energía potencial eléctrica de un electrón libre es cero. La energía que se debe suministrar a un átomo para que un electrón pase de su estado fundamental al estado excitado más elevado se conoce como **energía de ionización** del átomo, porque es la energía que se necesita para liberar el electrón de la atracción del núcleo, es decir, la energía necesaria para *ionizar* el átomo.

Figura 7.6
Algunos niveles de energía del átomo de hidrógeno



La Figura 7.7 representa un electrón de un átomo de hidrógeno que se desplaza al siguiente nivel de energía superior, y después vuelve rápidamente al estado fundamental cuando se libera un fotón.

Figura 7.7
Un átomo de hidrógeno y su electrón: **a** *en su estado fundamental,* **b** *en un estado excitado transitorio,* **c** *volviendo a su estado fundamental*



Ejemplo resuelto

2 Observa la Figura 7.7.

a ¿Cuál es la energía de ionización del átomo de hidrógeno?

b ¿Cuál es la frecuencia del fotón que se emite cuando los átomos descienden del nivel de energía de −3,4 eV al estado fundamental?

c El hidrógeno absorbe radiación con una longitud de onda de $6{,}7 \times 10^{-7}$ m. Identifica la transición en la que tiene lugar.

d ¿Cuántas transiciones de energía son posibles en teoría entre los niveles que se muestran?

a $2{,}18 \times 10^{-18}$ J

b $E = hf$

Diferencia en los niveles de energía (J) = $(2{,}18 - 0{,}54) \times 10^{-18} = (6{,}63 \times 10^{-34})f$

$f = 2{,}5 \times 10^{15}$ Hz

c $E = \frac{hc}{\lambda}$

$E = 6{,}63 \times 10^{-34} \times \frac{3{,}0 \times 10^{8}}{6{,}7 \times 10^{-7}}$

$E = 3{,}0 \times 10^{-19}\,J$

Este valor corresponde a la transición de subida desde el segundo al tercer nivel de energía.

d $6 + 5 + 4 + 3 + 2 + 1 = 21$

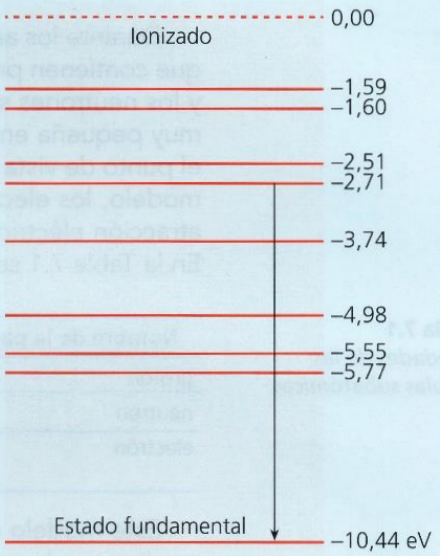
7 Considera la Figura 7.8.

a ¿Qué longitud de onda de radiación se emite en la transición que se muestra?

b ¿En qué zona del espectro electromagnético está esta radiación?

c Cuando la radiación de frecuencia $1{,}18 \times 10^{15}$ Hz atraviesa el vapor de mercurio frío, se absorbe. Identifica la transición que tiene lugar en este proceso.

d ¿Cuál es la longitud de onda más larga de radiación que se puede emitir en una transición entre los niveles que se indican?



Niveles de energía del mercurio

■ **Figura 7.8**
Algunos niveles de energía del mercurio

8 Si observamos detenidamente el espectro que emite el Sol con un espectrómetro (no mirando directamente al Sol, sino a una superficie blanca), detectamos que falta la luz de determinadas frecuencias y en su lugar se muestran líneas oscuras.

a Explica por qué la atmósfera gaseosa externa y fría del Sol es responsable de la ausencia de estas frecuencias.

b Sugiere cómo se podría usar un análisis del espectro de absorción solar para determinar qué elementos están presentes en la atmósfera del Sol.

9 Rydberg descubrió que las frecuencias de todas las líneas del espectro del hidrógeno se podían predecir mediante la siguiente expresión:

$f = 3{,}29 \times 10^{15}\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$, donde $n_1 < n_2$ (siendo ambos números enteros)

a Usa una hoja de cálculo para calcular las frecuencias previstas para $n_1 = 1$. Asigna a n_2 valores entre 2 y un número muy alto.

b Demuestra que la serie tiende a un límite numérico. ¿Cuál es ese límite? (Estas frecuencias se encuentran en la zona ultravioleta del espectro, y se conocen como serie de Lyman).

■ Estructura atómica

Antes de profundizar en el concepto de radiactividad debemos comprender la estructura de los átomos.

Naturaleza de la ciencia

¿Qué es la materia?

La pregunta «¿de qué está hecha la materia?» ha sido uno de los grandes interrogantes que se han formulado durante siglos tanto científicos como filósofos. En el año 2012 un gran descubrimiento (el «bosón de Higgs») confirmó un nuevo y significativo avance (véase la Sección 7.3), pero tenemos que remontarnos más de 2400 años para poder contar la historia desde el principio: Demócrito fue el primero en proponer que la materia estaba formada por átomos (aproximadamente en el 400 a. C.). Sin embargo, la primera teoría que presupone que el átomo tiene un núcleo central se formuló hace apenas 100 años.

Ernest Rutherford fue el primero que propuso el modelo *nuclear* básico del átomo en 1911 después del famoso experimento que Geiger y Marsden realizaron bajo su supervisión (véase la Sección 7.3). Según este modelo, el átomo está constituido por un **núcleo** central pequeño y denso, y por los electrones que orbitan a su alrededor. Dos años más tarde (en 1913) Niels Bohr planteó que la existencia de los niveles de energía podía explicarse si los electrones existían únicamente en órbitas específicas (conocidas como «capas» en química). Encontrarás más información en el Capítulo 12.

El diámetro de un átomo es normalmente de unos 10^{-10} m y el diámetro aproximado de un núcleo es de unos 10^{-15} m.

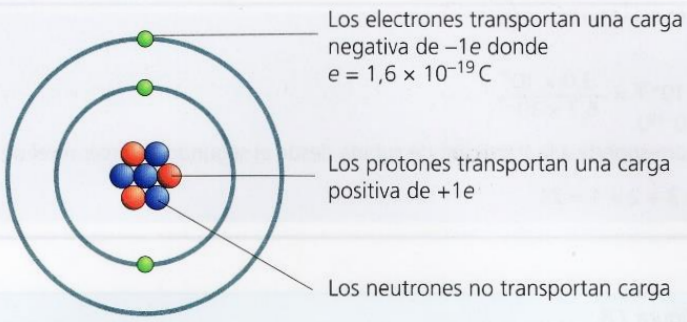


Figura 7.9
Modelo nuclear simple de un átomo de litio (no representado a escala)

Durante los años siguientes se confirmó que el núcleo está formado por **protones** y **neutrones**, que contienen prácticamente toda la masa del átomo. Los protones están cargados positivamente y los neutrones son eléctricamente neutros. Los electrones tiene carga negativa, pero su masa es muy pequeña en comparación con la de los protones y neutrones. Los átomos son neutros desde el punto de vista eléctrico porque tienen el mismo número de protones que de electrones. En este modelo, los electrones orbitan alrededor del núcleo debido a la fuerza centrípeta que genera la atracción eléctrica entre cargas opuestas, pero el átomo, en su mayor parte, es un espacio vacío. En la Tabla 7.1 se resumen las propiedades de los protones, neutrones y electrones.

Tabla 7.1
Propiedades de las partículas subatómicas

Nombre de la partícula	Masa relativa aproximada	Carga relativa
protón	1	+1
neutrón	1	0
electrón	$\frac{1}{1840}$	−1

Este modelo del átomo no fue *nunca* del todo satisfactorio porque la teoría electromagnética predice que los electrones con aceleración centrípeta irradian energía hacia el exterior (y en espiral hacia el interior). Además, había muchas propiedades de los átomos a las que esta teoría no podía dar explicación, como la *existencia* de los niveles de energía y la fuerza de repulsión entre los electrones.

Este modelo electrostático del átomo sigue siendo una forma habitual de representar la estructura atómica, pero se ha reemplazado por un modelo mecánico cuántico que se basa en el comportamiento ondulatorio de los electrones (véase el Capítulo 12). Hay muchas más partículas subatómicas además de los protones, electrones y neutrones, de las cuales se incluye más información más adelante en este capítulo (en la Sección 7.3).

Estructura nuclear

Número de protones, Z

El número de protones que hay en el núcleo de un átomo determina de qué elemento se trata. Por lo tanto, los átomos de un elemento en concreto se identifican por su **número de protones** (también denominado en ocasiones *número atómico*), al que se asigna el símbolo *Z*. En la tabla periódica los elementos están ordenados en orden creciente según su número de protones.

El **número de protones**, *Z*, es el número de protones que tiene el núcleo de un átomo.

Como los átomos son neutros desde el punto de vista eléctrico, el número de protones es igual al número de electrones que orbitan alrededor del núcleo.

Número de nucleones, *A*

El núcleo del átomo está constituido por neutrones y protones. El término **nucleón** se usa para designar a ambas partículas.

El **número de nucleones**, *A*, se define como el número total de protones y neutrones de un núcleo.

El número de nucleones representa la masa de un átomo porque la masa de un electrón es despreciable. Al número de nucleones también se le denomina *número másico*.

Número de neutrones, *N*

El **número de neutrones**, *N*, es el número de neutrones que hay en un núcleo.

La diferencia entre el número de nucleones y el número de protones da como resultado el número de neutrones que hay en el núcleo:

$$N = A - Z$$

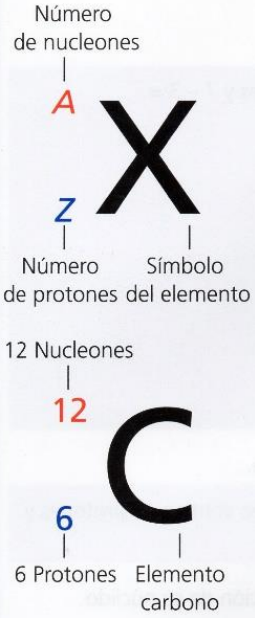


Figura 7.10
Notación estándar para especificar un núclido

Isótopos

Dos o más átomos con el mismo número de protones pueden tener un número *diferente* de neutrones. Los átomos son del mismo elemento, pero tienen distinto número de nucleones. Estos átomos se llaman **isótopos**.

Todos los isótopos de un elemento tienen las mismas propiedades químicas. La mayoría de los elementos tienen varios isótopos.

Núclidos

El término **núclido** se usa para especificar una especie (un tipo) particular de átomo, definido por la estructura de su núcleo.

Todos los átomos con el mismo número de nucleones y el mismo número de protones se describen como átomos del mismo *núclido*.

Existe una notación estándar (Figura 7.10) que se usa para representar un *núclido* mediante su número de protones y de nucleones.

Es importante aclarar la diferencia entre núclidos e isótopos. Cuando nos referimos a diferentes tipos de átomos los denominamos núclidos; sin embargo, cuando nos referimos en concreto a los átomos del mismo elemento con diferentes núcleos, los llamamos isótopos.

Algunos elementos tienen muchos isótopos, pero otros tienen muy pocos o solo uno. Por ejemplo, el isótopo más común de hidrógeno es el hidrógeno-1, ${}_1^1\mathrm{H}$, y su núcleo está formado por un único protón. Al hidrógeno-2, ${}_1^2\mathrm{H}$, se le denomina *deuterio* y su núcleo contiene un protón y un neutrón. Al hidrógeno-3, ${}_1^3\mathrm{H}$, con un protón y dos neutrones, se le llama *tritio*. Los isótopos del hidrógeno (Figura 7.11) intervienen en las reacciones de fusión (véase la Sección 7.2 y el Capítulo 8).

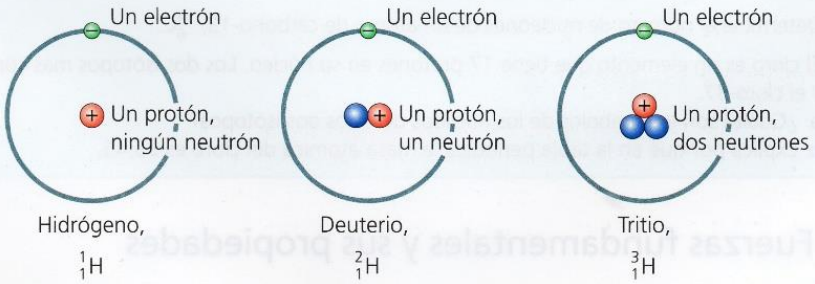


Figura 7.11
Los tres isótopos del hidrógeno

Como ejemplo adicional, los siguientes núclidos son tres isótopos del carbono:

${}_6^{12}\mathrm{C}$ (seis protones, seis neutrones)

${}_6^{13}\mathrm{C}$ (seis protones, siete neutrones)

${}_6^{14}\mathrm{C}$ (seis protones, ocho neutrones)

Las muestras de elementos normalmente son mezclas de isótopos. Los isótopos no se pueden separar por medios químicos, pero su separación se puede lograr mediante procesos que dependen de la diferencia entre las masas de los isótopos, por ejemplo la velocidad de difusión de los compuestos gaseosos.

La notación para describir los núclidos también se puede aplicar a los nucleones. Por ejemplo, un protón se puede escribir como ${}_1^1\mathrm{p}$ y un neutrón como ${}_0^1\mathrm{n}$. Del mismo modo, el electrón se puede representar usando esta notación: su carga es −1 en comparación con la carga +1 de un protón, por lo que un electrón se puede representar como ${}_{-1}^{0}\mathrm{e}$, para recordar que la masa (número) del electrón es realmente cero en comparación con la del protón y la del neutrón.

Ejemplos resueltos

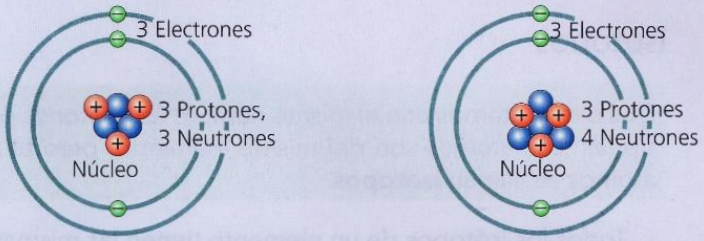
3 Deduce el número de nucleones, protones y neutrones de estos dos isótopos del litio:

$^{6}_{3}Li$ y $^{7}_{3}Li$

Dibuja dos diagramas simples que muestren la estructura de estos átomos.

Litio-6: 6 nucleones, 3 protones y 6 – 3 = 3 neutrones

Litio-7: 7 nucleones, 3 protones y 7 – 3 = 4 neutrones



■ **Figura 7.12**

4 El núcleo de un átomo de oxígeno se representa como $^{16}_{8}O$. Describe su estructura atómica.

El número de protones del núcleo es 8 y el número de nucleones es 16, por lo que el núcleo contiene 8 protones y 8 neutrones (16 – 8). También hay 8 electrones.

5 Un átomo de potasio contiene 19 protones, 19 electrones y 20 neutrones. Deduce la notación de su núclido.

El número de protones $Z = 19$, y el número de nucleones $A = 19 + 20 = 39$.

$^{39}_{19}K$

6 Determina el número de protones y neutrones de un átomo del isótopo plutonio-239, $^{239}_{94}Pu$.

número de protones, $Z = 94$

número de nucleones, $A = 239$

número de neutrones $N = A - Z = 239 - 94 = 145$

10 Los tres núclidos $^{129}_{53}I$, $^{137}_{55}Cs$ y $^{90}_{38}Sr$ se formaron durante los ensayos para la bomba atómica. Determina el número de neutrones, protones y electrones de los átomos de estos núclidos.

11 ¿Cuál es la carga eléctrica del núcleo $^{4}_{2}He$?

12 El número de electrones, protones y neutrones de un ión sulfuro es 18, 16 y 16, respectivamente. ¿Cuál es el símbolo del núclido correcto para el ión sulfuro?

13 Determina el número de nucleones de un átomo de carbono-13, $^{13}_{6}C$.

14 El cloro es un elemento que tiene 17 protones en su núcleo. Los dos isótopos más comunes del cloro son el cloro-35 y el cloro-37.

a ¿Cuáles son los símbolos de los núclidos de estos dos isótopos?

b Explica por qué en la tabla periódica la masa atómica del cloro es 35,45.

■ Fuerzas fundamentales y sus propiedades

En el Capítulo 5 hemos estudiado que hay fuerzas eléctricas entre las partículas con carga y que la ley de Coulomb se puede usar para calcular el módulo de esas fuerzas, tal y como se muestra en este ejemplo resuelto.

Ejemplo resuelto

7 **a** Calcula el módulo de la fuerza entre el núcleo de helio y uno de los electrones del átomo (suponiendo que la separación es de 10^{-10} m).

b Calcula la magnitud de la fuerza entre los dos protones del núcleo de helio.

a $F = k\dfrac{q_1 q_2}{r^2}$

$$F = (8{,}99 \times 10^{9}) \times \frac{(-1{,}6 \times 10^{-19}) \times (+1{,}6 \times 2 \times 10^{-19})}{(10^{-10})^2} \approx -10^{-7}\,\text{N (fuerza de atracción)}$$

b $F = k\dfrac{q_1 q_2}{r^2}$

$$F = (8{,}99 \times 10^{9}) \times \frac{(+1{,}6 \times 10^{-19}) \times (+1{,}6 \times 10^{-19})}{(10^{-15})^2} \approx +10^{2}\,\text{N (fuerza de repulsión)}$$

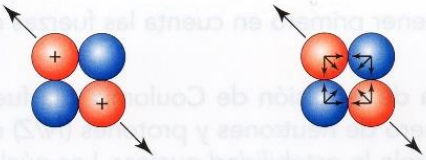


Figura 7.13
Fuerzas de atracción y repulsión en un núcleo de helio

En un modelo atómico simple las fuerzas de atracción entre el núcleo y los electrones mantienen a los electrones describiendo órbitas alrededor del núcleo, pero la existencia de fuerzas *mucho más intensas* (Ejemplo resuelto 7b) entre los protones dentro del núcleo sugiere que deben repelerse (véase la Figura 7.13a).

Es obvio que debe actuar otra fuerza intensa que se oponga a la repulsión eléctrica y permita que los protones se atraigan. Esta fuerza de atracción de corto alcance actúa entre los nucleones (incluidos los neutrones) y se conoce como **fuerza nuclear fuerte**.

La fuerza eléctrica es opuesta a 1/separación^2 (tal como indican las ecuaciones anteriores), pero la interacción nuclear fuerte debe disminuir mucho más rápidamente con la distancia porque es despreciable o nula, excepto cuando la separación entre los nucleones es muy pequeña, normalmente inferior a 10^{-15} m. En otras palabras, la interacción nuclear fuerte se extiende de forma efectiva solo a sus vecinos inmediatos, no a todos los nucleones del núcleo.

Esta interacción es una de las *cuatro fuerzas fundamentales* (interacciones) que hay en el universo:

- *Fuerza nuclear fuerte*: solo actúa sobre las partículas subatómicas conocidas como quarks (a partir de los cuales se constituyen los protones y neutrones). Tienen un «alcance corto» dentro del núcleo.
- *Fuerza electromagnética*: provoca los efectos magnéticos y electrostáticos, y actúa entre dos cargas. Es la fuerza que mantiene unidos a los electrones y los núcleos cargados positivamente para formar un átomo, y también la que mantiene unidos a los átomos para formar los sólidos, líquidos y gases. Es atractiva para las cargas de signo contrario y repulsiva para las cargas del mismo signo. Su alcance es infinito pero su módulo obedece la ley del inverso del cuadrado de la distancia.
- *Fuerza gravitatoria*: es la que existe entre dos objetos con masa. Esta fuerza mantiene unidas a las estrellas que forman las galaxias (véase la Opción D: Astrofísica). Siempre es atractiva y su alcance es infinito. Una galaxia puede experimentar la fuerza de atracción gravitatoria de otra galaxia a muchos miles de millones de kilómetros de distancia. Su módulo obedece la ley del inverso del cuadrado de la distancia y es la más débil de las cuatro fuerzas fundamentales.
- *Fuerza nuclear débil*: actúa en la desintegración nuclear (tiene un alcance incluso inferior a la interacción nuclear fuerte).

Estudiaremos con más detalle estas fuerzas fundamentales en la Sección 7.3.

Desintegración radiactiva

Enlace con la teoría del conocimiento

La suerte favorece a la mente preparada

El papel que desempeña la suerte o serendipia en los descubrimientos científicos exitosos va casi inevitablemente acompañado de una mente científicamente curiosa que luchará por el resultado del «afortunado» suceso. ¿Hasta qué punto los descubrimientos científicos que hemos descrito son consecuencia de la suerte o bien se pueden definir como el resultado de la razón o de la intuición?

Henri Becquerel descubrió la radiactividad de forma accidental en 1896 mientras llevaba a cabo una serie de experimentos sobre la fluorescencia. Durante el desarrollo de sus experimentos colocó sulfato de uranio y potasio (que emite radiactividad, aunque entonces nadie lo sabía) sobre una placa fotográfica envuelta en papel negro dentro de un cajón. Cuando Becquerel reveló la película descubrió que tenía la misma apariencia que si se hubiera expuesto a la luz del sol, algo que no era posible. De hecho, la radiación atravesó el compuesto de uranio y el papel negro, e impresionó la película. De esta forma tan peculiar y fortuita Becquerel descubrió la radiactividad. («**Serendipia**» es sinónimo de hallazgo valioso que se produce de manera casual o accidental).

Existen otros muchos ejemplos de descubrimientos científicos accidentales, pero no debemos creer que sean el resultado de la «suerte», ya que se deben dar determinados requisitos previos, como un espíritu de investigación y unas excelentes habilidades experimentales. Y, lo más importante, el científico necesita apreciar la importancia de lo que puede parecer en el momento un efecto menor (aunque Becquerel no estuvo al principio seguro de la explicación). Según esta cita atribuida al microbiólogo francés Louis Pasteur: «La suerte favorece a la mente preparada».

Para entender las causas de la radiactividad debemos tener primero en cuenta las fuerzas que actúan en el núcleo.

La relación entre las intensidades relativas de la fuerza de repulsión de Coulomb y la fuerza nuclear fuerte depende a su vez del cociente entre el número de neutrones y protones (N/Z) que hay en el núcleo. El equilibrio entre estas dos fuerzas controla la *estabilidad nuclear*. Los núcleos grandes con un número elevado de protones y neutrones (normalmente $Z > 82$) son inestables, porque las fuerzas eléctricas de repulsión de mayor alcance (consecuencia de un número elevado de protones) pueden ser más intentas que las fuerzas nucleares fuertes, de menor alcance. Sin embargo, muchos núclidos de masa más baja también son inestables. En la Figura 7.14 se indica cómo la estabilidad nuclear depende del cociente N/Z. Para los átomos con poca masa, los núcleos estables tienen aproximadamente igual número de protones y neutrones ($N = Z$), pero los núcleos más grandes necesitan más neutrones (que protones) para alcanzar la estabilidad.

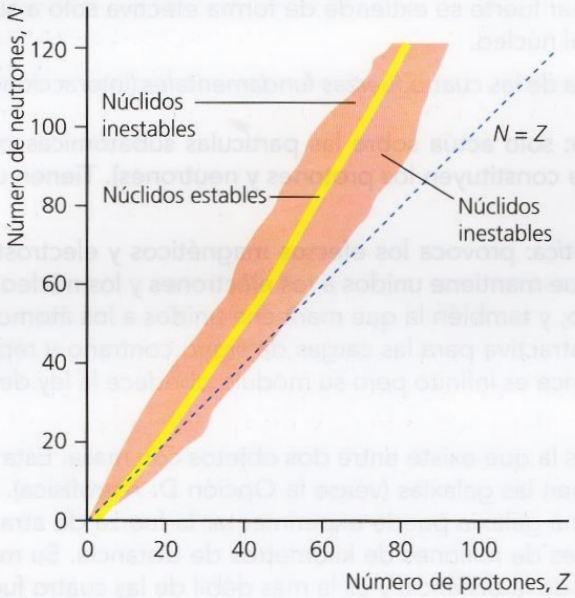


Figura 7.14
Núcleos estables en una gráfica donde se representa el número de neutrones frente al número de protones

Con la finalidad de ser más estables, los núcleos inestables pueden liberar **radiación nuclear** en forma de pequeñas partículas o rayos gamma. A este proceso también se le conoce como **radiación ionizante** porque provoca que los átomos de los materiales circundantes pierdan electrones y se conviertan en iones. La liberación de una partícula de un núcleo conlleva la formación de un núclido diferente de un elemento diferente. A este cambio se le denomina **transmutación**.

La **radiactividad** es la emisión de radiación ionizante provocada por los cambios en los núcleos de los átomos inestables. El proceso por el que los átomos radiactivos se trasforman en otros elementos se conoce como **desintegración radiactiva**.

No se debe confundir la desintegración radiactiva con la descomposición química o biológica, ya que la desintegración de un material radiactivo no implica normalmente un cambio en el aspecto.

Un material que emite cantidades apreciables de radiactividad se puede describir como *radiactivo*, mientras que a un átomo inestable se le denomina **radioisótopo** o **radionúclido**.

Debemos destacar que la desintegración de un núcleo inestable es espontánea, aleatoria, impredecible e incontrolable.

Ciertos factores como la composición química, la temperatura y la presión no afectan a la desintegración radiactiva ni a la emisión de radiación nuclear. No podemos controlar el momento en el que se produce la desintegración de los núcleos radiactivos, pero sí podemos controlar nuestra exposición a la radiación emitida.

Perspectivas adicionales

Efectos de la radiación ionizante en los seres humanos

Toda radiación que puede provocar ionización supone un peligro para el ser humano. La radiación ionizante se genera de muchas formas y proviene de muchas fuentes. Incluye la radiación procedente de sustancias radiactivas naturales y la que procede de fuentes artificiales, como los aparatos de rayos X de los hospitales y los reactores nucleares.

Las personas están expuestas a diversas radiaciones ionizantes que suponen un riesgo para la salud. Este riesgo se debe a la energía de radiación que absorben los tejidos, y cuya consecuencia es la formación de iones que pueden matar o modificar las células vivas.

Las dosis muy elevadas de radiación pueden provocar que las células dejen de funcionar e impedir que lleven a cabo la división celular, lo que conlleva que esas células mueran. La afectación generalizada de células de diferentes tejidos puede provocar la muerte. También pueden aparecer efectos diferidos a largo plazo de la radiación ionizante, como la esterilidad y distintos tipos de cáncer, especialmente la leucemia (cáncer de los glóbulos blancos) y anomalías genéticas heredadas (mutaciones) en los hijos de personas que han estado expuestas a una radiación.

Los efectos a corto plazo de la exposición a dosis elevadas de radiación incluyen quemaduras cutáneas (enrojecimiento y úlceras en la piel) provocadas principalmente por las radiaciones beta y gamma, así como ceguera y formación de cataratas. La enfermedad por radiación se produce cuando una persona se expone a una única dosis alta de radiación. Los principales síntomas son las náuseas y los vómitos, además de fiebre, caída del cabello y cicatrización deficiente.

Los expertos médicos no están seguros de cuáles son los efectos de las exposiciones a dosis bajas de radiación. En las estimaciones del riesgo de los daños por radiación se asume que como la dosis de la radiación es menor, el riesgo se reduce proporcionalmente.

Los principales riesgos de las radiaciones alfa y beta son las fuentes que consiguen adentrarse en el cuerpo. Como las partículas alfa y beta no penetran con demasiada profundidad en el organismo, las fuentes sólidas o líquidas externas apenas presentan riesgos. Sin embargo, se debe evitar en todo momento ingerir materiales radiactivos o inhalar (respirar) el aire que los contiene, por lo que está prohibido comer, beber o fumar mientras se manipulan este tipo de materiales y es necesario llevar guantes desechables y ropa de protección. En las minas donde el aire contiene partículas de polvo radiactivo también se deben usar máscaras.

Los rayos gamma y los rayos X de fuentes externas pueden irradiar los tejidos y órganos más internos, por lo que las personas que están expuestas a fuentes de este tipo de radiación se deben proteger lo máximo posible. Es necesario tomar ciertas medidas para limitar la dosis que recibe una persona: usar protectores de plomo, mantener una distancia de seguridad a la fuente y reducir al máximo el tiempo de exposición.

Las personas que trabajan con radiación ionizante pueden llevar un dosímetro personal de radiación que facilita el registro continuo de la dosis de radiación recibida. También es posible hacer un seguimiento de la contaminación por radiación de los trabajadores mediante detectores de radiación antes de que abandonen su puesto de trabajo. Los que manipulan materiales radiactivos pueden utilizar herramientas con control a distancia y permanecer detrás de una gruesa pared protectora de plomo y hormigón.

Los materiales radiactivos que se usan en medicina se eligen con el máximo cuidado para que tengan los mínimos efectos negativos sobre el organismo.



Los reactores nucleares producen una gran cantidad de radiación electromagnética de alta frecuencia (rayos gamma) y residuos radiactivos. El almacenamiento seguro de los residuos nucleares durante miles de años es un tema de seguridad de gran relevancia que requiere un debate internacional. Los reactores nucleares también generan una elevada cantidad de neutrones, que se liberan de los núcleos de los átomos de uranio. Los neutrones a alta velocidad son otra forma de radiación ionizante peligrosa.

1 Explica por qué se usa la radiación nuclear de forma generalizada en los hospitales aunque presente un grave riesgo para la salud.

Partículas alfa, partículas beta y rayos gamma

Los núclidos radiactivos pueden emitir tres tipos de radiación:

- partículas alfa
- partículas beta (positivas y negativas)
- rayos gamma (normalmente asociados a la emisión alfa o beta).

Los átomos de un mismo radionúclido siempre emiten el mismo tipo de radiación.

Radiación alfa

Una **partícula alfa** es como un núcleo de helio-4: la combinación de dos protones y dos neutrones. Su número de nucleones es 4 y su número de protones es +2. Las partículas alfa se representan con los símbolos $^4_2\alpha$ o ^4_2He.

Evidentemente la emisión de una partícula alfa tiene como resultado la pérdida de dos protones y dos neutrones de un núcleo, de modo que el número de protones del núclido se reduce dos unidades y se genera un elemento nuevo (transmutación). Este proceso se puede representar mediante una **ecuación nuclear** del siguiente modo:

$$\underset{\text{núclido padre}}{^A_Z\text{X}} \rightarrow \underset{\text{núclido hijo}}{^{A-4}_{Z-2}\text{H}} + \underset{\text{partícula alfa}}{^4_2\text{He}}$$

Las ecuaciones nucleares deben mantener el equilibrio: la suma del número de nucleones y el número de protones debe ser igual en ambos miembros de la ecuación. Los términos *núclido padre* y *núclido hijo* se usan normalmente para describir los núclidos antes y después de la desintegración, respectivamente.

El cambio a un núcleo más estable equivale a una reducción de la energía potencial nuclear, y esta energía es la que se transfiere a la energía cinética de la partícula alfa (y al núcleo hijo). Como después de la desintegración solo quedan dos partículas, inicialmente se deben desplazar en sentidos contrarios. Este comportamiento obedece a la ley de la conservación del momento, que también predice que una partícula alfa tendrá una velocidad mucho mayor (si se emite desde un núcleo masivo). Las partículas alfa que emite un mismo tipo de núclido normalmente tienen la misma velocidad y la misma energía, aproximadamente 5 MeV (recuerda: energía en J = energía en eV/1,6 × 10^{-19}). (Pero algunos radionúclidos pueden emitir partículas alfa de diferentes energías).

Por ejemplo, cuando se desintegra un núcleo de radio-226, se emite una partícula alfa y se forma un núcleo de radón-222. Este proceso se describe mediante esta ecuación nuclear:

$$^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$$

La partícula alfa que se genera en esta desintegración tiene una energía cinética de 4,7 MeV.

Radiación beta

En un núcleo inestable es posible que un neutrón sin carga eléctrica se convierta en un protón con carga positiva y un electrón con carga negativa. En este proceso también se crea otra partícula denominada **antineutrino** (electrónico), $\bar{\nu}_e$. Los antineutrinos (y los neutrinos) son partículas *muy* pequeñas que no tienen carga, de ahí que sea difícil detectarlas.

$$^1_0\text{n} \rightarrow {}^1_1\text{p} + {}^0_{-1}\text{e} + \bar{\nu}_e$$

Después de que tenga lugar esta reacción, el electrón recién formado no puede permanecer dentro del núcleo, y es expulsado del átomo a una velocidad muy elevada (próxima a la velocidad de la luz). Entonces recibe el nombre de **partícula beta negativa** y se representa con los símbolos $^0_{-1}\beta$ o $^0_{-1}\text{e}$.

Cuando tiene lugar la desintegración beta negativa, el número de nucleones del núcleo sigue siendo el mismo, pero el número de protones aumenta una unidad, por lo que se forma un elemento nuevo (transmutación). Lo podemos representar mediante una ecuación nuclear:

$$\underset{\text{núclido padre}}{^A_Z\text{X}} \rightarrow \underset{\text{núclido hijo}}{^A_{Z+1}\text{X}} + \underset{\text{partícula beta}}{^0_{-1}\text{e}} + \bar{\nu}_e$$

Como sucede en la desintegración alfa, el cambio a un núcleo más estable equivale a una reducción de la energía potencial nuclear, y esta se transfiere a la energía cinética de las partículas.

Como hay tres (en lugar de dos) partículas después de la desintegración, que se pueden desplazar en distintas direcciones, las partículas beta que emite el mismo tipo de núclido *no* tendrán todas la misma velocidad ni la misma energía (ley de la conservación del momento). Sin embargo, habrá una energía máxima bien definida, con un valor aproximado de 1 MeV.

Por ejemplo, cuando un núcleo de estroncio-90 experimenta una desintegración beta, se emiten partículas beta negativas y se genera un núcleo de itrio-90.

$$^{90}_{38}\text{Sr} \rightarrow {}^{90}_{39}\text{Y} + {}^{0}_{-1}\text{e} + \bar{\nu}_e$$

La partícula beta negativa de esta desintegración tiene una energía cinética de 0,55 MeV.

En un proceso similar que se conoce como desintegración beta *positiva*, un protón con carga positiva de un núcleo se convierte en un neutrón y en un electrón con carga positiva, denominado **positrón**, que se expulsa entonces del átomo (momento tras el cual se denomina **partícula beta positiva**). Al mismo tiempo se genera un neutrino electrónico, ν_e. Se considera que el electrón y el positrón forman una dualidad materia–antimateria, y lo estudiaremos con más detalle en la Sección 7.3.

$$^{1}_{1}\text{p} \rightarrow {}^{1}_{0}\text{n} + {}^{0}_{+1}\text{e} + \nu_e$$

La ecuación siguiente representa una desintegración beta positiva común:

$$^{23}_{12}\text{Mg} \rightarrow {}^{23}_{11}\text{Na} + {}^{0}_{+1}\text{e} + \nu_e$$

Para entender correctamente qué es la desintegración beta es necesario saber qué son los quarks y la fuerza nuclear débil (véase la Sección 7.3).

Radiación gamma

Los **rayos gamma** son una forma de radiación electromagnética (fotones) de alta energía y elevada frecuencia que liberan los núcleos inestables. La longitud de onda típica suele ser de 10^{-12} m, lo que corresponde de forma aproximada a una energía de 1 MeV (a partir de $E = hc/\lambda$). Los rayos gamma, que se suelen representar con el símbolo $^{0}_{0}\gamma$, normalmente se generan después de que un núcleo inestable haya emitido una partícula alfa o beta.

Por ejemplo, cuando se genera un núcleo de torio-234 a partir de la desintegración alfa de un núcleo de uranio-238, el núcleo de torio contiene exceso de energía y se dice que está en un *estado excitado*. El núcleo de torio excitado (que se representa en una ecuación con el símbolo *) vuelve a un estado más estable emitiendo un rayo gamma:

$$^{234}_{90}\text{Th}^{*} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^{0}_{0}\gamma$$

Como los rayos gamma no tienen ni masa ni carga, la composición de los núcleos que se emiten no varía. No hay transmutación.

15 Completa las siguientes ecuaciones nucleares e indica el nombre del proceso que tiene lugar.

a $^{131}_{53}\text{I} \rightarrow \text{Xe} + {}^{0}_{-1}\text{e}$

b $^{241}_{95}\text{Am} \rightarrow \text{Np} + {}^{4}_{2}\text{He}$

16 Un rayo gamma tiene una longitud de onda de $5{,}76 \times 10^{-12}$ m. ¿Cuál es la energía (en MeV) de un fotón de esta radiación?

17 Escribe las ecuaciones nucleares de las siguientes reacciones nucleares:

a desintegración alfa del $^{184}_{78}\text{Pt}$

b desintegración beta negativa del $^{24}_{11}\text{Na}$

c emisión gamma del $^{60}_{27}\text{Co}$

Usa una tabla periódica para identificar los nuevos elementos que se forman.

18 Calcula la velocidad de una partícula alfa con una energía cinética de 3,79 MeV (consulta el *Apéndice de datos de Física* para obtener las masas que necesitas).

19 Usa la ley de conservación del momento para explicar por qué las partículas beta que emite una misma fuente deben tener un rango (espectro) de velocidades y energías diferentes.

20 Cuando el núcleo inestable del magnesio-23 se desintegra, se emite un positrón (desintegración beta positiva). Escribe la ecuación nuclear del proceso.

Experimentos de radiactividad

Las propiedades de las radiaciones nucleares se pueden investigar en un laboratorio escolar si se dispone de las fuentes radiactivas adecuadas. De forma alternativa, se pueden usar aparatos o programas informáticos que simulen experimentos radiactivos.

La exposición del cuerpo humano a la radiación ionizante de una fuente radiactiva supone un peligro para la salud (véanse las Perspectivas adicionales, página 293), por lo que es importante que cualquier fuente radiactiva que se use tenga una potencia muy baja y que se manipule siguiendo las medidas de seguridad apropiadas. Podemos destacar las siguientes:

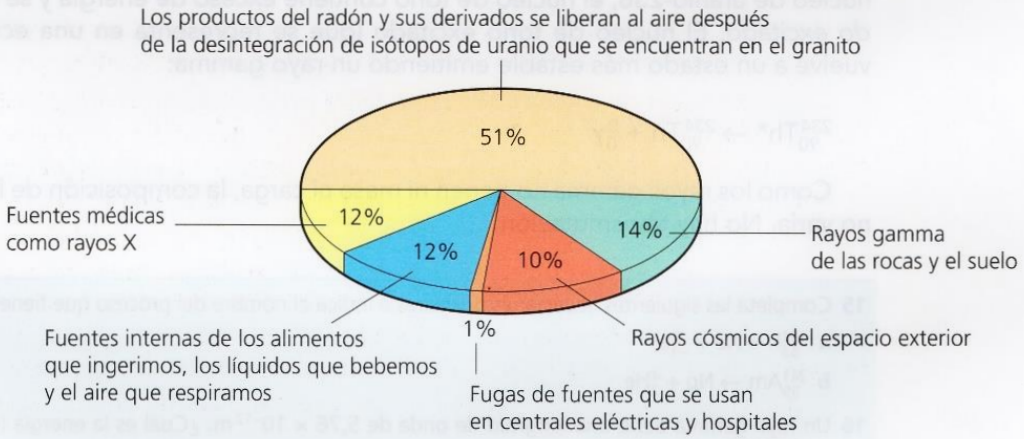
- Las fuentes se deben guardar en contenedores gruesos y con recubrimiento de plomo. Si no se usan, se deben almacenar de forma segura en un lugar cerrado.
- El tiempo de manipulación de las fuentes debe ser el mínimo posible.
- Las fuentes se deben etiquetar correctamente y con las advertencias de seguridad apropiadas.
- Las fuentes se deben manipular con pinzas y se deben mantener alejadas de las personas.
- Se pueden emplear pantallas de plomo para evitar que la radiación se extienda fuera del aparato.

Cuando la radiación nuclear entra en un detector, normalmente se detecta como eventos únicos, que se «contabilizan», de modo que podemos referirnos al **recuento** o a la **tasa de recuento** (recuento por segundo) de un detector y un *contador* (Geiger). La naturaleza impredecible de las desintegraciones radiactivas individuales implica que se puede observar una variación significativa en el recuento. Esto no supone un error, pero se conseguirán medidas más coherentes a medida que se obtenga un mayor número de recuentos.

Radiación de fondo

En casi todas las sustancias se generan *de forma natural* trazas de isótopos radiactivos y, por lo tanto, todos estamos expuestos a niveles muy bajos de radiación en todo momento. Es un hecho que no se puede evitar y se conoce como **radiación de fondo**. Evidentemente, algunos lugares tienen recuentos de radiación de fondo más elevados que otros. En la Figura 7.15 se muestran las fuentes más comunes de radiación de fondo en el Reino Unido.

Figura 7.15 *Fuentes de radiación de fondo en el Reino Unido*



Las fuentes internas son núclidos radiactivos, como el potasio-40, $^{40}_{19}K$, que están presentes en nuestro organismo. El gas radón que hay en el aire procede de materiales radiactivos como el radio, el torio y el uranio, que forman parte de la corteza terrestre. Aunque parte de la radiación cósmica del espacio llega al suelo, la mayor parte la absorbe la atmósfera de la Tierra. Sin embargo, las personas que realizan vuelos a grandes altitudes y los astronautas reciben dosis mucho mayores de radiación cósmica. Los rayos cósmicos incluyen núcleos de átomos de hidrógeno y helio que se desplazan muy rápido.

Las medidas de recuentos de radiación de las fuentes de un laboratorio se deben ajustar para el recuento de fondo. Por ejemplo, si el recuento de fondo es de 30 min^{-1} en el momento en que se mide una tasa de recuento de una fuente de 387 s^{-1}, entonces la velocidad ajustada sería de 386,5 s^{-1}, aunque es obvio que el recuento de fondo es más significativo si se realizan menos lecturas.

Características de absorción de las partículas de desintegración

Uno de los estudios más frecuentes en el campo de la radiactividad son las pruebas de absorción de la radiación ionizante en diversos materiales. No obstante, primero debemos entender cómo se produce su absorción (espectro de absorción) en el aire.

Las partículas alfa se absorben en unos pocos centímetros de aire (normalmente cuatro o cinco), las partículas beta penetran algo más, hasta los 30 cm, mientras que los rayos gamma son muy penetrantes porque apenas se absorben en el aire. Sin embargo, observaremos que la tasa de recuento de un rayo gamma descenderá rápidamente a medida que aumente la distancia a la fuente porque, incluso sin absorción, mientras los rayos se propagan, su intensidad se reduce siguiendo una relación inversa al cuadrado de la distancia.

Cuando las partículas alfa y las partículas beta atraviesan la materia, chocan con los átomos y provocan que estos pierdan uno o varios electrones. A este átomo ionizado (ion) y al electrón libre resultante se les denomina *par de iones* (Figura 7.16). Cuando la energía cinética de la partícula se reduce a un valor bajo (en comparación con los átomos que la rodean), deja de moverse y se considera «absorbida».

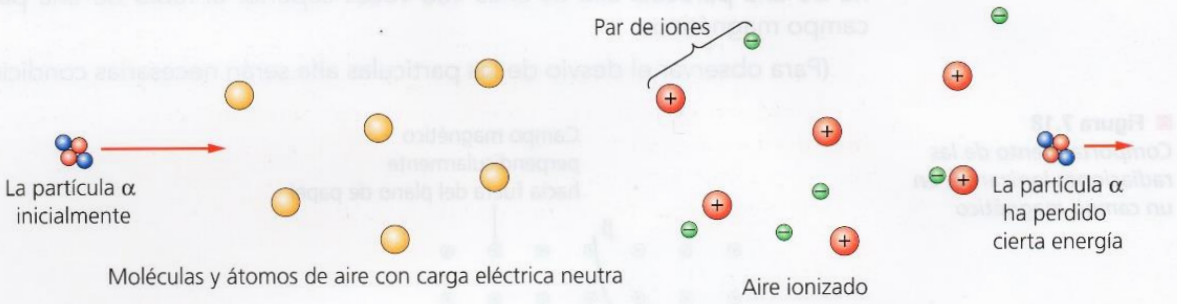


Figura 7.16
Formación de pares de iones a partir de partículas alfa de moléculas del aire

Para que se forme un par de iones es necesario que se separen cargas de distinto signo, por lo que este proceso requiere energía. Las partículas alfa tienen una masa relativamente grande, de modo que transfieren energía de una forma bastante efectiva cuando chocan con moléculas que suelen tener una masa superior. Esto permite que las partículas alfa sean ionizantes muy eficaces que pueden producir hasta 10^5 pares de iones por cada centímetro de aire por el que pasan. Como consecuencia, pierden energía muy rápidamente y su *poder de penetración* es bajo.

Las partículas beta tienen bastante menos masa que las partículas alfa y, consecuentemente, son mucho menos eficaces a la hora de transferir energía durante las colisiones. Generan menos pares de iones por centímetro y son, por este motivo, mucho más penetrantes que las partículas alfa.

Como los rayos gamma no tienen ni carga ni masa, su capacidad ionizante es muy inferior a la de las partículas alfa y beta. Su elevado poder de penetración los convierte en el tipo de radiación más peligrosa que puede penetrar en nuestro organismo procedente de una fuente externa. Su energía también se transfiere en su totalidad en una única interacción, en lugar de hacerlo gradualmente durante muchas colisiones, y de este modo provoca más daños a las células del cuerpo.

En general cabe esperar que la absorción de cualquier radiación sea mayor en los materiales más densos. En la Figura 7.17 se ilustra la absorción de las radiaciones nucleares en papel, aluminio y plomo, que se han convertido en los materiales estándar que se utilizan para comparar las absorciones. Como las partículas alfa se absorben con facilidad en la atmósfera, las pruebas de absorción en otros materiales se deben realizar a pocos centímetros de la superficie.

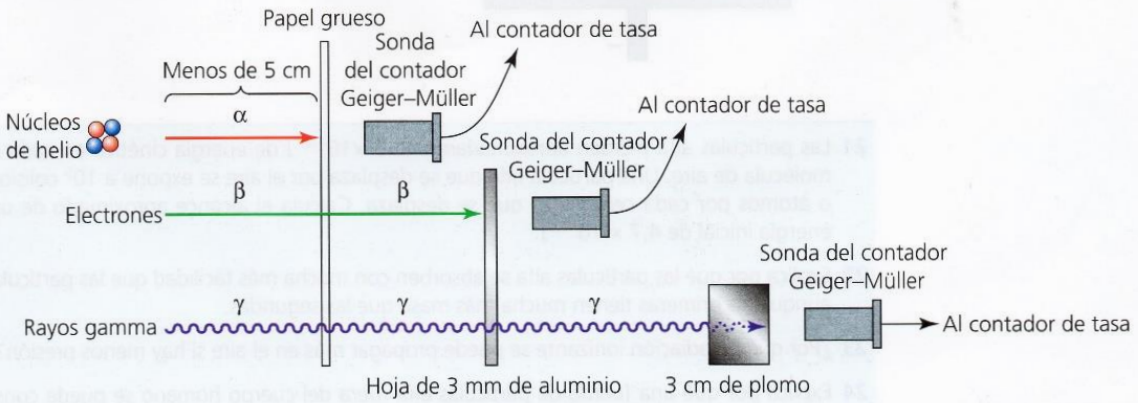


Figura 7.17
Absorción de radiaciones ionizantes

Una radiación desconocida se puede identificar a partir de los materiales que absorbe. También se puede identificar a partir de su comportamiento en los campos eléctrico y magnético, tal como explicamos en la siguiente sección.

Desvío de la radiaciones en los campos

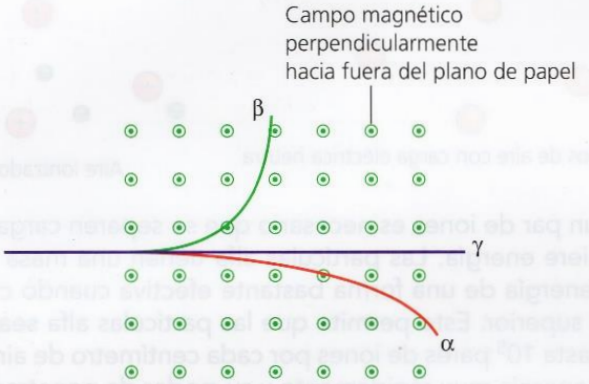
La radiación alfa y la radiación beta se emiten en direcciones aleatorias desde sus fuentes, pero se pueden concentrar en haces estrechos (colimados) si se hacen pasar por rendijas. Como un haz de partículas alfa o de partículas beta es un flujo de carga, se desviará si atraviesa perpendicularmente un campo magnético (tal como se explicó en el Capítulo 5). La radiación gamma no está cargada, por lo que no se puede desviar.

En la figura 7.18 se muestra cómo atraviesan un campo magnético intenso los tres tipos de radiación ionizante. Se puede usar la regla de la mano izquierda, o regla de Fleming, para confirmar el desvío de las partículas alfa y beta en trayectorias circulares, donde la fuerza magnética es la que suministra la fuerza centrípeta. El radio de la trayectoria de una partícula cargada que se desplaza perpendicularmente al atravesar un campo magnético se puede calcular a partir de esta fórmula: $r = mv/qB$ (página 252).

Una partícula alfa tiene el doble de carga y aproximadamente una masa 8000 veces mayor que una partícula beta, aunque una partícula beta normal se puede desplazar a una velocidad diez veces superior. Teniendo en cuenta estos tres factores, podemos predecir que el radio de la trayectoria de una partícula alfa es unas 400 veces superior al radio de una partícula beta en el mismo campo magnético.

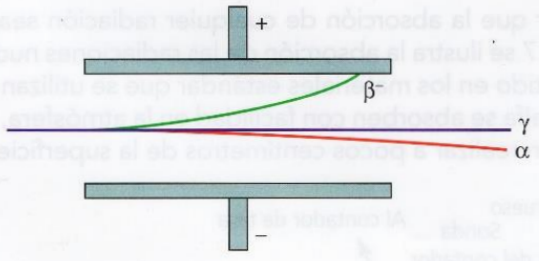
(Para observar el desvío de las partículas alfa serán necesarias condiciones de vacío).

Figura 7.18 *Comportamiento de las radiaciones ionizantes en un campo magnético*



Las radiaciones alfa y beta también se pueden desviar mediante campos eléctricos, tal como se representa en la Figura 7.19. Las placa negativa atrae a las partículas alfa, mientras que la placa positiva atrae a las partículas beta. La combinación de la velocidad constante en una dirección, la fuerza perpendicular constante y la aceleración, generan una trayectoria parabólica. Esta trayectoria es similar al movimiento descrito por un proyectil que explicamos en el Capítulo 2. El desvío de las partículas alfa es pequeño en comparación con el de las partículas beta, debido a los mismos factores que se han argumentado para la desviación magnética.

Figura 7.19 *Comportamiento de las radiaciones ionizantes en un campo eléctrico*



21 Las partículas alfa pierden aproximadamente 5×10^{-18} J de energía cinética en cada colisión con un átomo o una molécula de aire. Una partícula alfa que se desplaza por el aire se expone a 10^5 colisiones ionizantes con moléculas o átomos por cada centímetro que se desplaza. Calcula el alcance aproximado de una partícula alfa si tiene una energía inicial de $4{,}7 \times 10^{-13}$ J.

22 Explica por qué las partículas alfa se absorben con mucha más facilidad que las partículas beta con la misma energía, aunque las primeras tienen mucha más masa que las segundas.

23 ¿Por qué la radiación ionizante se puede propagar más en el aire si hay menos presión?

24 Explica por qué una fuente de partículas alfa *fuera* del cuerpo humano se puede considerar un riesgo bajo para la salud, mientras que una fuente dentro del organismo supone un riesgo elevado.

25 Se detecta la radiación procedente de una fuente de rayos gamma a una distancia de 12 cm de la fuente y se registra una tasa de recuento de 373 s^{-1}. Calcula la tasa de recuento si la distancia:
- **a** se reduce a 6 cm
- **b** se incrementa a 39 cm.

26 Durante un estudio sobre radiactividad se mide tres veces el recuento de fondo y se obtienen los resultados siguientes: 38 min^{-1}, 41 min^{-1} y 36 min^{-1}.
- **a** Explica por qué las tres medidas son diferentes.
- **b** Calcula la tasa media de recuento de fondo en s^{-1}.
- **c** ¿Por qué la radiación de fondo genera problemas en los experimentos en los que se miden tasas de recuento bajas?

27 Explica cómo se pueden identificar las partículas beta mediante experimentos en los que se observa su capacidad para penetrar diferentes materiales.

Resumen de las propiedades de las partículas alfa y beta y de los rayos gamma

Tabla 7.2 *Resumen de las propiedades de las radiaciones alfa, beta y gamma*

Propiedad	Alfa (α)	Beta (β^+ or β^-)	Gamma (γ)
Carga relativa	+2	+1 o −1	0
Masa relativa	4	$\frac{1}{1840}$	0
Penetración característica	5 cm de aire; papel fino	30 cm de aire; unos pocos milímetros de aluminio	muy penetrante; absorbida parcialmente por materiales gruesos y densos
Naturaleza	núcleo de helio	positrón o electrón	onda electromagnética/fotón
Velocidad característica	$10^7\,m\,s^{-1}$ ≈ 0,1c	≈ $2,5 \times 10^8\,m\,s^{-1}$ ≈ 0,9c	$3,00 \times 10^8\,m\,s^{-1}$ c
Notación	${}^4_2He$ o ${}^4_2\alpha$	${}^0_{-1}e$ o ${}^0_{-1}\beta$	γ o ${}^0_0\gamma$
Capacidad ionizante	muy elevada	ligera	muy baja
Absorbido por	trozo de papel	3 mm de aluminio	Intensidad reducida a la mitad con 2 cm de plomo

Modelos de desintegración radiactiva

La desintegración de un solo núcleo inestable es un suceso espontáneo y aleatorio. Es impredecible del mismo modo que es impredecible el resultado que obtenemos al lanzar una única moneda al aire. Sin embargo, podemos asegurar que si lanzamos la moneda muchas veces, aproximadamente en el 50% de los casos obtendremos cara y en el otro 50% cruz. Del mismo modo, podemos afirmar que cuando tenemos un número elevado de núcleos sin desintegrar, aproximadamente el 5% se desintegrarán en un tiempo determinado. Incluso la muestra más pequeña de material radiactivo contiene un número muy alto de núcleos y esto significa que el proceso aleatorio de desintegración radiactiva se puede predecir.

Semivida (o periodo de semidesintegración)

La semivida (o periodo de semidesintegración) de un núclido radiactivo es el tiempo que tarda en desintegrarse la mitad de cualquier muestra de núcleos inestables.

La semivida se representa con el símbolo $T_{1/2}$. Las semividas pueden variar mucho entre los distintos núclidos radiactivos: desde fracciones de segundo hasta miles de millones de años. Véase la Tabla 7.3 para consultar algunos ejemplos.

Tabla 7.3
Ejemplos de semividas (o periodos de semidesintegración)

Núclido radiactivo	Semivida
uranio-238	$4{,}5 \times 10^9$ años
radio-226	$1{,}6 \times 10^3$ años
radón-222	3,8 días
francio-221	4,8 minutos
astato-217	0,03 segundos

Cuando haya transcurrido una semivida (o periodo de semidesintegración), la mitad de los núcleos inestables que quedan se desintegrarán en la siguiente semivida. A modo de ejemplo simplificado, si hay 64 (miles de millones) de núcleos al principio, después de las sucesivas semividas el número que quedará será aproximadamente de 32, 16, 8, 4, 2... Teóricamente esta cifra nunca se reducirá a cero.

Figura 7.20
El lanzamiento de dados se puede utilizar para simular el modelo de desintegración radiactiva



Se puede hacer una simulación del proceso de desintegración radiactiva mediante el lanzamiento de dados (Figura 7.20). Consideremos el siguiente experimento en el que un grupo de estudiantes comienza lanzando 6000 dados. Cada vez que obtienen un seis, el dado correspondiente se retira. En la Tabla 7.4 se muestran los resultados del número de dados que quedan y se retiran después de cada lanzamiento.

Tabla 7.4
Resultados del experimento del lanzamiento de dados

Número de lanzamientos	Número de dados que quedan	Número de dados que se retiran
0	6000	0
1	5020	980
2	4163	857
3	3485	678
4	2887	598
5	2420	467
6	2009	411
7	1674	335
8	1399	75

En la gráfica de la Figura 7.21 se ha representado el número de dados que quedan respecto al número de lanzamientos. Este es un ejemplo de *curva de desintegración*. La tasa a la que se retiran los dados (que han obtenido un seis) disminuye porque al lanzarse menos dados, es más difícil obtener un seis. Según los valores de la gráfica, necesitaríamos unos 3,8 lanzamientos para reducir el número de dados a la mitad. Después de otros 3,8 lanzamientos, el número de dados volvería a reducirse a la mitad, por lo que la «semivida» del proceso es de 3,8 lanzamientos.

También se podría dibujar una gráfica con el número de dados que se retiran respecto al número de lanzamientos, y tendría la misma forma y la misma semivida que la de la Figura 7.21.

El experimento de los dados es un modelo (analogía) muy útil para representar la desintegración radiactiva, en el que los dados representan los 6000 núcleos radiactivos y la tasa de desintegración disminuye con el tiempo.

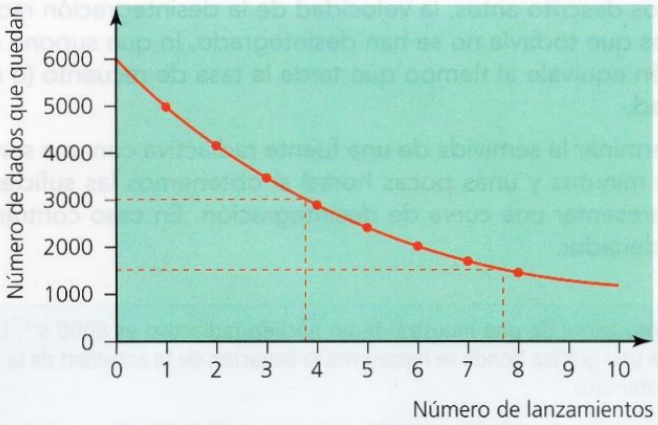


Figura 7.21
Gráfica del número de dados que quedan respecto al número de lanzamientos

La gráfica de la Figura 7.21 es un ejemplo de una cantidad que experimenta una desintegración en la que la tasa de desintegración (ejemplificada por el dado) es directamente proporcional a la cantidad que queda (número de dados). Esto se conoce como *decrecimiento (o decaimiento) exponencial*. No es necesario aplicar aquí los conceptos matemáticos para calcular el decrecimiento exponencial, pero se explican en el Capítulo 12 y en los cursos de matemáticas del IB.

La figura 7.22 representa una gráfica característica de la desintegración radiactiva con una semivida (o periodo de semidesintegración) $T_{1/2}$. Tiene la misma forma que la Figura 7.21. Se puede determinar el valor de la semivida seleccionando *cualquier* valor y buscando el tiempo que tarda ese valor en reducirse a la mitad. Para conseguir una mayor exactitud se pueden elegir varios pares de valores y calcular su valor medio.

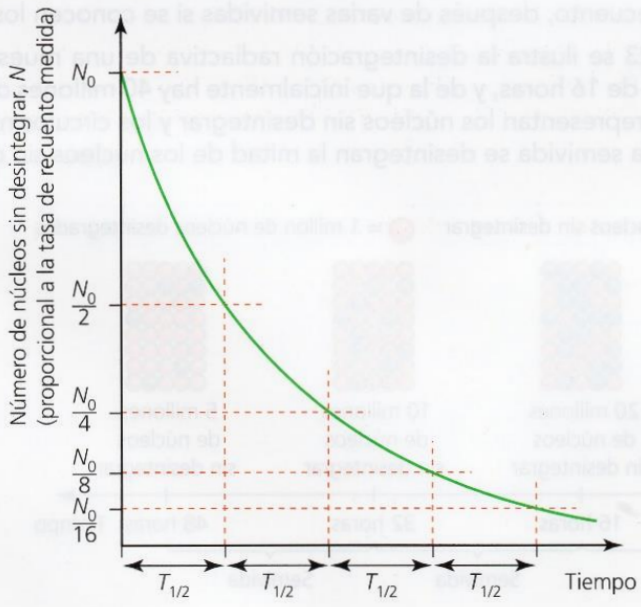


Figura 7.22
Curva de desintegración radiactiva

Por ejemplo, el radio-226 (un emisor alfa) tiene una semivida de 1620 años. Esto significa que si inicialmente tenemos 1 g de radio-226 puro, cuando hayan transcurrido 1620 años se habrán desintegrado 0,5 g. Cuando vuelvan a transcurrir 1620 años (otra semivida), la mitad de los átomos de radio-226 que queden también se habrán desintegrado y quedarán 0,25 g, y así sucesivamente.

Determinación experimental de la semivida

En una fuente radiactiva para experimentos escolares no se puede contar el número de núcleos sin desintegrar, por lo que necesitamos usar ciertas modificaciones en las tasas de recuento para determinar las semividas. La tasa de recuento que mide un contador de radiación colocado cerca de una fuente de radiación será un indicador de la tasa de desintegración de la fuente. (Se conoce como *actividad* al número real de desintegraciones que tienen lugar cada segundo en la fuente y su unidad es el *bequerel*, *Bq*. Se estudiará en el Capítulo 12).

Tal como hemos descrito antes, la velocidad de la desintegración radiactiva es proporcional al número de átomos que todavía no se han desintegrado, lo que supone que la semivida de un radionúclido también equivale al tiempo que tarda la tasa de recuento (o actividad de la fuente) en reducirse a la mitad.

Se puede determinar la semivida de una fuente radiactiva con una semivida razonable (un valor entre unos pocos minutos y unas pocas horas) si obtenemos las suficientes medidas de tasa de recuento para representar una curva de desintegración. En caso contrario, se puede realizar una simulación por ordenador.

28 La tasa de recuento inicial de una muestra de un núclido radiactivo es 8000 s^{-1}. La semivida del núclido es de 5 minutos. Dibuja una gráfica donde se represente la variación de la actividad de la muestra durante un intervalo de tiempo de 25 minutos.

29 La siguiente tabla muestra la variación respecto al tiempo, *t*, de la tasa de recuento de una muestra de un núclido radiactivo X. La media del recuento de fondo del experimento es 36 min^{-1}.

***t*/hora**	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tasa de recuento/min^{-1}	854	752	688	576	544	486	448	396	362	334	284

a Dibuja una gráfica donde se muestre la variación temporal de la tasa de recuento corregida.
b Usa la gráfica para determinar la semivida del núclido X.

30 Explica por qué sería difícil que un laboratorio facilitara un radioisótopo con una semivida de, por ejemplo, 10 minutos.

Problemas de desintegración radiactiva

Si se conoce la semivida de un núclido, se puede determinar el número de núcleos sin desintegrar, o la tasa de recuento, después de varias semividas si se conocen los valores iniciales.

En la figura 7.23 se ilustra la desintegración radiactiva de una muestra de americio-242, que tiene una semivida de 16 horas, y de la que inicialmente hay 40 millones de núcleos sin desintegrar. Los círculos grises representan los núcleos sin desintegrar y los círculos naranjas los núcleos desintegrados. Con cada semivida se desintegran la mitad de los núcleos sin desintegrar que quedan.



Figura 7.23 *Desintegración radiactiva de una muestra de americio-242*

Este proceso de desintegración radiactiva se resume de forma numérica en la Tabla 7.5.

Tabla 7.5 *Desintegración radiactiva de una muestra de americio-242*

Número de núcleos sin desintegrar	Fracción de núcleos sin desintegrar iniciales que quedan	Número de núcleos desintegrados	Número de semividas transcurridas	Número de horas transcurridas
40×10^6	1	0	0	0
20×10^6	½	20×10^6	1	16
10×10^6	¼	30×10^6	2	32
$5{,}0 \times 10^6$	⅛	35×10^6	3	48
$2{,}5 \times 10^6$	1/16	$37{,}5 \times 10^6$	4	64

Ejemplos resueltos

8 La semivida del francio-221 es 4,8 minutos.
- **a** Calcula qué fracción de una muestra de francio-221 puro queda sin desintegrar después de transcurridos 14,4 minutos.
- **b** ¿Qué fracción de la muestra inicial se habrá desintegrado?

a La semivida del francio-221 es 4,8 minutos, por lo que 14,4 minutos equivalen a tres semividas (14,4 ÷ 4,8). Después de una semivida, la mitad de la muestra queda sin desintegrar.

Después de dos semividas, 0,5 × 0,5 = 0,25 de la muestra queda sin desintegrar.

Después de tres semividas, 0,5 × 0,25 = 0,125 de la muestra queda sin desintegrar.

Por lo tanto, cuando hayan transcurrido 14,4 minutos, la fracción de francio-221 que queda sin desintegrar será de 0,125 o $\frac{1}{8}$.

b $1 - \frac{1}{8} = \frac{7}{8}$

9 El cesio-137 tiene una semivida de 30 años. Si la tasa de recuento de una fuente es 10^4 s^{-1}, ¿cuál es la tasa de recuento cuando han transcurrido:
- **a** 120 años
- **b** 135 años?

a 120 años equivalen a cuatro semividas, por lo que la tasa de recuento habrá disminuido un factor 16 (2^4) y será $10^4/16 = 630$ s^{-1}.

b 135 años equivalen a 4,5 semividas, por lo que sabemos que el recuento tendrá un valor entre 625 y 313, aunque no es el punto medio entre estos valores porque la desintegración no es lineal. Los conceptos matemáticos que se necesitan para realizar esta operación se explican en la Sección 12.2. (La respuesta correcta es 442 s^{-1}).

31 Una sustancia radiactiva tiene una semivida de cinco días y la tasa de recuento inicial es 500 min^{-1}. Si el recuento de fondo que se registra es 20 min^{-1}, ¿cuál será la tasa de recuento cuando hayan transcurrido 15 días?

32 **a** La semivida del francio-221 es 4,8 minutos. Calcula la fracción de una muestra de francio-221 que queda sin desintegrar después de 24,0 minutos.
- **b** La semivida del radón-222 es de 3,8 días. Calcula la fracción de una muestra de radón-222 que se ha desintegrado transcurridos 15,2 días.
- **c** El cobalto-60 se usa en muchas aplicaciones en las que se requieren radiaciones gamma. Su semivida es de 5,26 años. Una fuente de cobalto-60 tiene una actividad inicial de 2,00 $\times 10^{15}$ desintegraciones s^{-1}. ¿Cuál será su actividad después de 26,30 años?
- **d** Un elemento radiactivo tiene una semivida de 80 minutos. ¿Cuánto tiempo tardará en descender la tasa de recuento a 250 por minuto si la tasa inicial es de 1000 por minuto?
- **e** La semivida del radio-226 es 1601 años. Para una muestra inicial:
  - **i** ¿qué fracción se ha desintegrado transcurridos 4803 años?
  - **ii** ¿qué fracción queda sin desintegrar después de 6404 años?

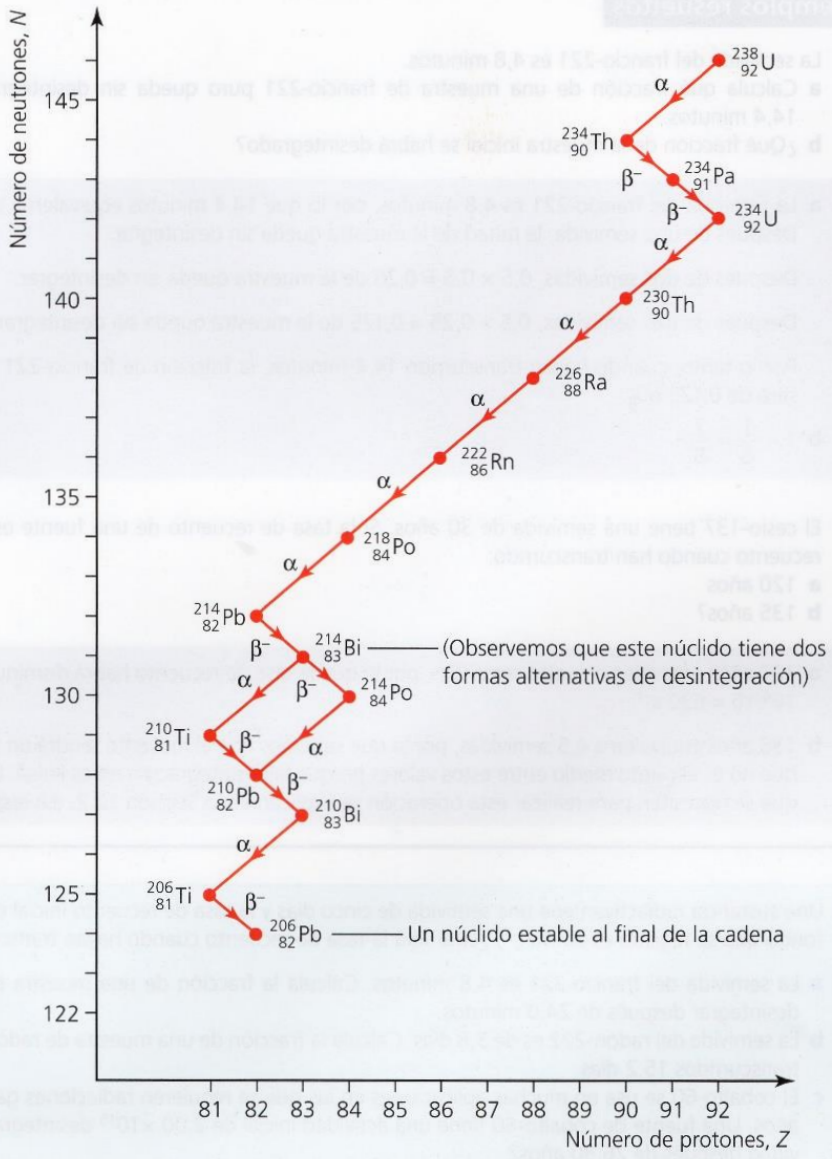
33 El tecnecio-99 es un residuo radiactivo que se origina en las centrales nucleares y tiene una semivida de 212 000 años.
- **a** Estima el porcentaje de tecnecio que todavía es radiactivo después de un millón de años.
- **b** ¿Cuántos años es necesario aproximadamente que trascurran para que la actividad del tecnecio descienda al 1% de su valor original?

Series de desintegración

Los núclidos de elementos radiactivos pesados, como el radio-226 y el uranio-238, no pueden llegar a ser estables si emiten solo una partícula. Experimentan una **serie de desintegración** radiactiva, en la que generan una partícula alfa o una beta, y quizá radiación gamma durante cada fase, hasta que se crea un núclido estable. Por ejemplo, el uranio-238 experimenta una serie de desintegración (véase la Figura 7.24) para acabar generando plomo–206 estable. Cada desintegración tiene su propia semivida específica.

Si fuera posible tener una fuente de uranio-238 puro, por ejemplo, se iniciaría inmediatamente la desintegración en otros núclidos y, después de cierto tiempo, todos los núclidos de la serie de desintegración estarían presentes en la muestra. La proporción relativa de cada núclido depende de su semivida. Después de un periodo *muy* largo la mayor parte de la muestra se habrá convertido en plomo. En otras palabras, debemos suponer que muchas fuentes radiactivas (particularmente de los elementos más pesados) contienen una gran variedad de núclidos diferentes.

Figura 7.24
Un ejemplo de serie de desintegración (uranio-238) sobre una gráfica de los núclidos



En la Figura 7.24 se representa una pequeña parte de toda la gráfica *N*–*Z*. Aconsejamos observar una gráfica completa de número de neutrones–número de protones, que se conoce con el nombre de *tabla de los núclidos*, porque recoge todos los núclidos conocidos. En ella se indican con total claridad los núclidos estables e inestables, así como el tipo de radiación que emiten.

En la Figura 7.25 se representa cómo cambia la posición registrada de un núclido durante la desintegración alfa y la desintegración beta negativa (la desintegración beta positiva tiene lugar en sentido contrario). El movimiento en la tabla se puede entender como un intento de desplazarse hacia la línea de estabilidad. Los rayos gamma no provocan transmutación.

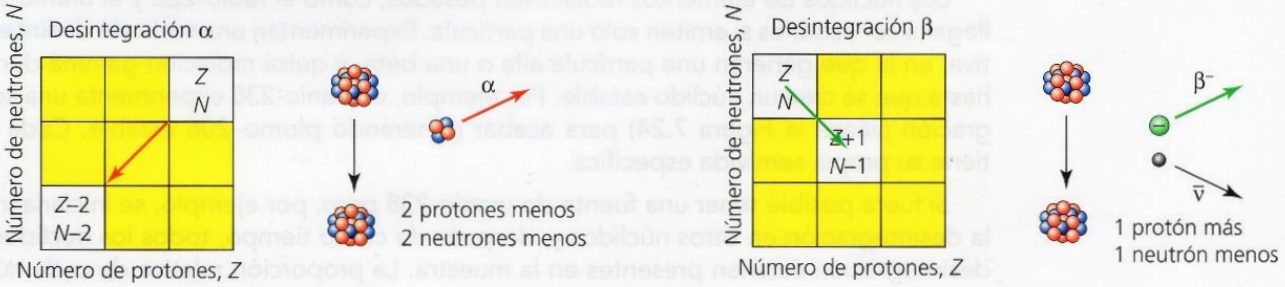


Figura 7.25
Transmutaciones en la tabla de los núclidos

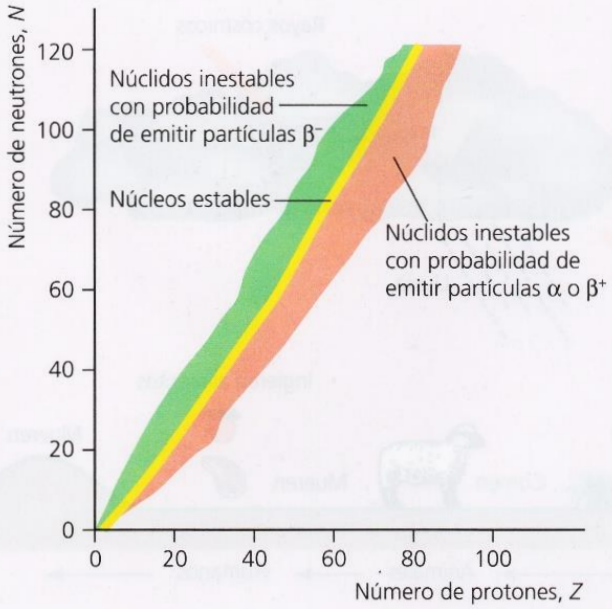


Figura 7.26
Estabilidad y transmutaciones en la tabla de los núclidos

Usos de los radionúclidos

Las sustancias radiactivas tienen una gran variedad de usos y, aunque no los incluimos directamente en el curso de IB, se recomienda a los estudiantes buscar información sobre una o dos de las aplicaciones siguientes:

- diagnóstico de enfermedades
- tratamiento de enfermedades
- «marcadores»
- conservación de alimentos
- esterilización de equipos médicos
- determinación de la edad de las rocas
- localización de fallos en estructuras metálicas, como tuberías
- datación mediante el método del carbono radiactivo

Aplicaciones

Datación mediante el método del carbono radiactivo

Las muestras arqueológicas (que en su día fueron plantas y animales vivos) que tienen menos de 50 000 años se pueden datar con el isótopo carbono-14. El carbono-14, que tiene una semivida de 5730 años, se forma continuamente en las capas superiores de la atmósfera. Cuando los rayos cósmicos entran en la atmósfera pueden generar neutrones. Tiene lugar la siguiente reacción nuclear:

$$^{14}_{7}N + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{14}_{6}C + {}^{1}_{1}H$$

Este tipo de reacción es un ejemplo de una transmutación natural en la que un núclido absorbe otra partícula más pequeña en su núcleo y experimenta una reacción nuclear en la que se genera un núclido nuevo.

Las plantas absorben carbono-14 (presente en la atmósfera como dióxido de carbono $^{14}CO_2$) durante la fotosíntesis. Hay animales que se alimentan de esas plantas y que a su vez pueden servir de alimento a otros animales. Sin embargo, cuando el animal o la planta mueren, ya no absorben más carbono-14 radiactivo y el porcentaje que queda disminuye debido a la desintegración radiactiva (Figura 7.27).

Esto significa que si se conoce la proporción entre el carbono-14 y el carbono-12, se puede determinar la edad de la muestra. La actividad del carbono-14 en los seres vivos es de unos 19 recuentos por minuto por cada gramo de muestra. Esta técnica se puede utilizar para determinar las edades de restos de animales, de la madera, el papel y los tejidos. También ha facilitado pruebas evidentes de la modificación (evolución) que ha tenido lugar en los grupos de organismos con el paso del tiempo.

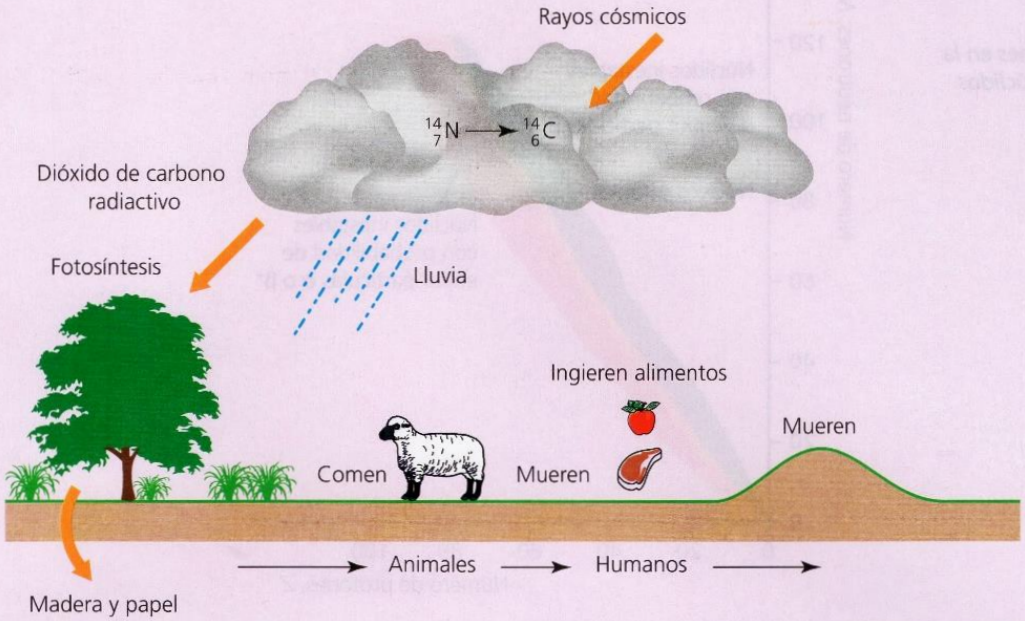


Figura 7.27
El carbono-14 se incorpora en los tejidos vivos

1 Busca al menos un ejemplo concreto del uso del método del carbono radiactivo para determinar la edad de un artefacto histórico.

2 Dibuja una gráfica en la que se muestre la variación de la tasa de recuento del carbono-14 de una muestra durante aproximadamente 20 000 años.

Aplicaciones

Trazadores médicos

En medicina nuclear se utilizan sustancias radiactivas para detectar (o tratar) anomalías en la función de determinados órganos del cuerpo. Las sustancias que se introducen en el cuerpo con este objetivo se denominan *trazadores* y se pueden administrar por vía intravenosa o vía oral (véase la Figura 7.28). El radiomarcador que se usa con más frecuencia es el tecnecio-99m, un átomo excitado que se genera a partir del molibdeno-99 mediante desintegración beta. El proceso de desintegración tiene una semivida de seis horas y la energía de los fotones gamma es de 0,14 MeV. Ambas propiedades permiten que el tecnecio-99m sea una opción idónea en los estudios con trazadores. La cantidad de energía que transportan los fotones gamma facilita su detección (con una cámara de rayos gamma), y la semivida de seis horas es una buena alternativa, de modo que la actividad dura lo suficiente como para aprovechar su utilidad en medicina nuclear, pero al mismo tiempo se respeta el deseo de exponer al paciente a la radiación ionizante durante el menor tiempo posible. El tecnecio se usa normalmente para «etiquetar» una molécula que el tejido incorpora de forma preferente. Todo esto demuestra cómo los conocimientos sobre la radiactividad, las sustancias radiactivas y la ley de desintegración radiactiva son cruciales en la medicina nuclear actual.

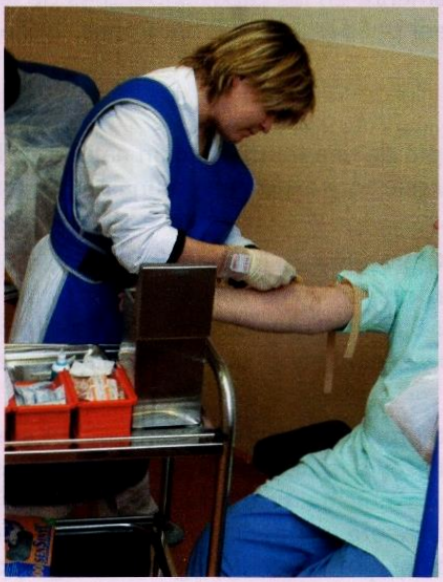


Figura 7.28
Persona inyectando un radiomarcador

1 Escribe una ecuación que represente la formación del tecnecio-99m.

7.2 Reacciones nucleares

En las desintegraciones nucleares se puede liberar energía como resultado de la relación entre la masa y la energía

En esta sección nos centraremos en la energía que se puede liberar cuando hay cambios en la estructura de los núcleos. Estos cambios incluyen:

- desintegraciones radiactivas naturales espontáneas, tal como estudiamos en la Sección 7.1
- fisión nuclear (división de un núcleo en dos núcleos más pequeños)
- fusión nuclear (unión de dos núcleos pequeños para formar dos núcleos más grandes)
- otras reacciones inducidas artificialmente.

Como veremos, cuando se libera energía, las masas que intervienen en el proceso deben reducirse ligeramente, de modo que empezaremos definiendo la unidad de masa atómica unificada.

La unidad de masa atómica unificada

El kilogramo es una unidad grande muy poco práctica para medir las masas de los átomos y las partículas subatómicas. La *unidad de masa atómica unificada*, u, es la que más se usa para masas a escala microscópica. Esta unidad es aproximadamente igual a la masa de un protón o de un neutrón, pero a continuación incluimos su definición más precisa:

La **unidad de masa atómica unificada** se define como una doceava parte de la masa de un átomo aislado de carbono-12.

En el Capítulo 3 hemos estudiado que, por definición, un mol de carbono-12 tiene una masa de 12,00000 g y contiene $6{,}022141 \times 10^{23}$ átomos (este es el valor de N_A con siete cifras significativas).

Por lo tanto, la masa de un átomo de carbono-12 $= \dfrac{12{,}00000}{6{,}022141 \times 10^{23}} = 1{,}992647 \times 10^{-23}$ g y una unidad de masa atómica unificada, $u = \dfrac{1}{12}(1{,}992647 \times 10^{-23}\,\text{g}) = 0{,}166054 \times 10^{-23}\,\text{g}$

Con cuatro cifras significativas, $1\ u = 1{,}661 \times 10^{-27}$ kg.

Este valor figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Las *masas en reposo* del protón, neutrón y electrón expresadas en unidades de masa atómica unificadas son:

- masa del protón, $m_p = 1{,}007276$ u $(= 1{,}673 \times 10^{-27}\,\text{kg})$
- masa del neutrón, $m_n = 1{,}008665$ u $(= 1{,}675 \times 10^{-27}\,\text{kg})$
- masa del electrón, $m_e = 0{,}000549$ u $(= 9{,}110 \times 10^{-31}\,\text{kg})$

Todos estos valores figuran en el *Apéndice de datos de Física*.

La **masa en reposo** de una partícula es la masa de una partícula aislada que está en reposo relativo respecto al observador.

Relación entre masa y energía

Según la teoría especial de la relatividad de Einstein, *cualquier* masa, *m*, es equivalente a una cantidad de energía, *E*. Einstein enunció que «la masa y la energía son manifestaciones diferentes de una misma cosa», de modo que si la energía de cualquier sistema aumenta (de cualquier forma), entonces su masa también aumenta. Esta teoría se explica con más detalle en la Opción A: Relatividad.

La masa y la energía de un sistema son proporcionales, E/m = constante. La constante es la velocidad de la luz, *c*, al cuadrado, de modo que:

$$E = mc^2$$

De acuerdo con esta famosa ecuación, una masa muy pequeña equivale a una cantidad *enorme* de energía. Por ejemplo, una masa de 1 g equivale a unos 10^{14} J. Si aumentamos o disminuimos la energía de un objeto cotidiano modificando su energía potencial, energía cinética o energía interna, siempre habrá un cambio en la masa, pero será demasiado insignificante para que podamos

medirlo. Pero a escala atómica, las cantidades relativamente grandes de energía se transfieren a partir de masas relativamente pequeñas, por lo que la **equivalencia masa–energía** se hace mucho más relevante y útil.

Siempre que el resultado final de una reacción nuclear sea la liberación de energía de un átomo, debe haber un descenso correspondiente en la masa del núcleo, Δm, que es equivalente a la pérdida de energía que experimenta, ΔE. El núcleo tiene menos energía, por lo que su masa debe ser menor.

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

La energía equivalente de 1 u = $(1{,}6605 \times 10^{-27}) \times (2{,}9979 \times 10^{8})^2 = 1{,}4924 \times 10^{-10}$ J

Si convertimos los julios en electronvoltios: $(1{,}4924 \times 10^{-10})/(1{,}6022 \times 10^{-19}) = 9{,}315 \times 10^{8}$ eV

La energía equivalente a la masa de 1 u es 931,5 MeV.

A una escala mayor, cuando un kilogramo de uranio-235 experimenta un proceso de fisión en un reactor nuclear, la energía total que se libera de los núcleos es aproximadamente 8×10^{13} J. Esta cifra corresponde a una reducción, pequeña pero medible, de la masa total:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} = \frac{8 \times 10^{13}}{(3{,}00 \times 10^{8})^2} \approx 9 \times 10^{-4}\,\text{kg}$$

Enlace con la teoría del conocimiento

Cambio de paradigma en física

La aceptación de que la masa y la energía son equivalentes fue un cambio de paradigma fundamental en física. ¿Cómo han modificado otros cambios de paradigma la dirección de la ciencia? ¿Ha habido otros cambios de paradigma similares en otras áreas del conocimiento?

Un **paradigma** en física es un modelo ampliamente aceptado y una manera de pensar en la que se considera y describe un aspecto de la física. El **cambio de paradigma** tiene lugar cuando se descarta una paradigma a favor de otro, lo que suele implicar un cambio radical.

Durante muchos siglos los científicos habían considerado que la energía y la masa eran dos conceptos distintos que no estaban relacionados entre sí. Sin embargo, la propuesta de Einstein según la cual la masa y la energía son equivalentes cambió por completo esa manera de pensar. Se trataba de un paradigma completamente novedoso. La equivalencia masa–energía es un concepto fundamental en la mayoría de los estudios e investigaciones que se efectúan actualmente en física, desde la física de partículas y la física nuclear hasta la cosmología.

Uno de los cambios de paradigma más conocidos en la ciencia fue el cambio de modelo del universo geocéntrico al modelo heliocéntrico (y posteriormente a un modelo sin centro). Cada uno de ellos rechazaba al que le precedía como fundamentalmente defectuoso, y parece que la ciencia no puede tener por voluntad propia modelos conflictivos que describan lo mismo. Puede que estos conflictos no se planteen del mismo modo en otras áreas del conocimiento.

Una unidad alternativa para la masa a escala atómica

Teniendo en cuenta la equivalencia entre masa y energía, podemos volver a considerar la unidad que utilizamos para la masa. Como $m = Ec^{-2}$, la unidad de masa se puede expresar como la energía dividida por la velocidad de la luz al cuadrado.

La unidad de masa en el SI es $J/(m\ s^{-1})^2$, que se conoce como kilogramo.

Pero, tal como hemos visto en la física atómica y la física nuclear, la energía normalmente se mide en electronvoltios, eV (keV o MeV). En este sistema de medida la unidad de masa se convierte en MeV c^{-2}, una unidad que no se conoce con ningún otro nombre.

Ejemplo resuelto

10 La masa en reposo de un protón es 1,007276 u.

a ¿A cuánto equivale esta masa en unidades de MeV c^{-2}?

b ¿Cuál es la energía equivalente a esta masa?

a $1{,}007276 \times 931{,}5 = 938{,}3\,\text{MeV}\,c^{-2}$

b 938,3 MeV

34 Usa la relación de equivalencia masa-energía de Einstein para calcular la energía equivalente a 500 g de materia.

35 Un átomo pierde una masa de $2{,}2 \times 10^{-30}$ kg después de una reacción nuclear. Determina la energía que se obtiene en julios debido a esta pérdida de masa nuclear.

36 Calcula el incremento de masa cuando 1,00 kg de agua absorbe $4{,}20 \times 10^{4}$ J de energía para generar un aumento de temperatura de 10,0 °C.

37 La reducción de masa durante la desintegración de un átomo de radio es $8{,}5 \times 10^{-30}$ kg. Calcula la energía equivalente en MeV.

Defecto de masa y energía de enlace nuclear

En cualquier núcleo, las fuerzas nucleares fuertes mantienen unidos a los nucleones, por lo que se puede describir como un *sistema ligado*. Si queremos separar algunos nucleones, o todos, (en un experimento mental de física de partículas), tendríamos que administrar energía al sistema. Véase la Figura 7.29.

La **energía de enlace** de un núcleo es la cantidad de energía que se necesita para separar completamente *todos* sus nucleones.

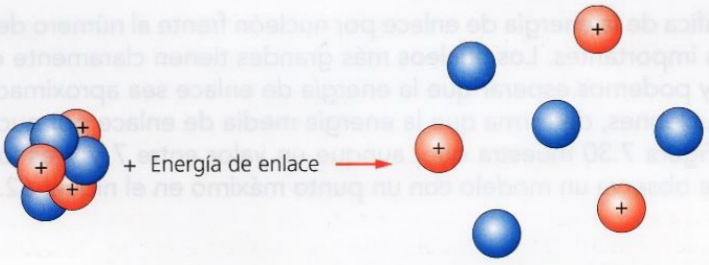


Figura 7.29
Para separar nucleones es necesario aportar energía de enlace; este ejemplo es el litio-7

La energía de enlace también se puede interpretar como la energía que se *libera* cuando se forma un núcleo a partir de sus nucleones. Es decir, la energía de enlace es equivalente a la energía potencial del núcleo.

La energía necesaria para separar un nucleón del núcleo es aproximadamente igual a la energía de enlace dividida por el número de nucleones, y se conoce como **energía media de enlace por nucleón**. Se considera que los núcleos con valores elevados para su energía media de enlace por nucleón son los más estables. (No se debe confundir la estabilidad nuclear con la estabilidad química). El níquel-62 es el núclido con la energía media de enlace por nucleón más alta.

Si se suministra energía a un sistema, significa que la masa del sistema debe aumentar (equivalencia masa-energía), de modo que la masa total de los nucleones separados debe ser mayor que su masa total cuando están unidos en el núcleo.

Vamos a ver un ejemplo con cifras: la masa de un átomo de carbono-12 es (por definición) 12,000000 u. El átomo está formado por seis protones, seis neutrones y seis electrones. Sin embargo, la suma de las masas en reposo individuales de las partículas subatómicas es superior a 12,000000 u, tal como demuestra el siguiente cálculo:

$$(6 \times 1{,}007276\,\text{u}) + (6 \times 1{,}008665\,\text{u}) + (6 \times 0{,}000549\,\text{u}) = 12{,}09894\,\text{u}$$

Si estas partículas se unen para formar un átomo de carbono-12, hay una reducción de la masa de 0,09894 u y un incremento equivalente en la energía potencial nuclear. Esta diferencia en la masa se denomina *defecto de masa* del átomo, y el término se aplica por lo general al núcleo.

El **defecto de masa** de un núcleo es la diferencia entre la masa del núcleo y la suma de las masas de sus nucleones por separado.

La energía de enlace y el defecto de masa de un núcleo son equivalentes entre sí.

Ejemplos resueltos

11 Un núcleo determinado tiene un defecto de masa de 0,369 u.
a ¿Cuál es su energía de enlace en MeV?
b Si contiene 40 nucleones, ¿cuál es la energía media de enlace por nucleón?

a $0{,}369 \times 931{,}5 = 344\,\text{MeV}$

b $\frac{344}{40} = 8{,}6\,\text{MeV}$

12 Calcula el defecto de masa (en electronvoltios) y la energía de enlace de un átomo de helio (4,00260 u), sabiendo que tiene dos protones (cada uno con una masa de 1,007276 u), dos neutrones (cada uno con una masa de 1,008665 u) y dos electrones (cada uno con una masa de 0,000549 u). $1\ \text{u} = 931{,}5\ \text{MeV}c^{-2}$.

La masa total de las partículas individuales $= (2 \times 1{,}007276) + (2 \times 1{,}008665) + (2 \times 0{,}000549)$
$= 4{,}03298\,\text{u}$

Defecto de masa $= 4{,}03298 - 4{,}00260 = 0{,}03038\,\text{u}$

$\Delta E = 0{,}03038 \times 931{,}5 = 28{,}30\,\text{MeV}$

Variaciones en la estabilidad nuclear (energía media de enlace por nucleón)

Una gráfica de la energía de enlace por nucleón frente al número de nucleones muestra algunas variaciones importantes. Los núcleos más grandes tienen claramente energías de enlace globales más altas, y podemos esperar que la energía de enlace sea aproximadamente proporcional al número de nucleones, de forma que la energía media de enlace por nucleón sea constante. Sin embargo, la Figura 7.30 muestra que, aunque un valor entre 7 y 9 es lo común para la mayoría de núclidos, se observa un modelo con un punto máximo en el níquel-62.

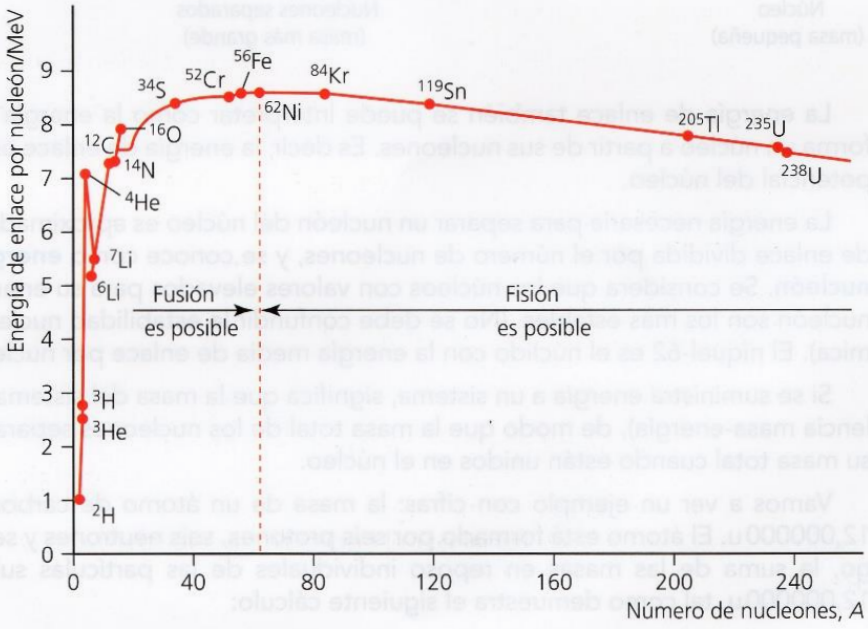


Figura 7.30
Una gráfica de la energía por nucleón frente al número de nucleones

Esta gráfica se representa algunas ocasiones en sentido contrario, con energías de enlace *negativas*. El uso de energías de enlace negativas es coherente con los sistemas en los que las partículas por separado tienen energía cero y las partículas enlazadas tienen energía de enlace negativa, lo que significa que se debe suministrar energía al sistema para conseguir que la energía sea nula. Al igual que en otros ejemplos, recordemos que a los niveles de energía de los electrones atómicos se les asigna valores negativos y que las energías potenciales gravitatorias son siempre negativas.

Ejemplo resuelto

13 Determina la energía de enlace por nucleón del núcleo de $^{12}_{6}C$.

Masa en reposo total de los protones y neutrones individuales:

$(6 \times 1{,}007276\,u) + (6 \times 1{,}008665\,u) = 12{,}095646\,u$

Defecto de masa:

$12{,}095646\,u - 12{,}000000\,u = 0{,}0956465\,u$

Energía de enlace por nucleón:

$$\frac{0{,}0956465 \times 931{,}5}{12} = 7{,}425\,\text{MeV por nucleón}$$

38 La energía de enlace de un núcleo de carbono-14 es 102 MeV. Calcula la energía de enlace por nucleón.

39 Calcula la energía de enlace (en MeV) de un núcleo de nitrógeno-14 con un defecto de masa de 0,108517 u.

40 La masa de un átomo de níquel-62 es 61,92835 u. Calcula su energía media de enlace por nucleón (el número de protones del níquel es 28).

41 **a** Estima la energía media de enlace por nucleón del uranio-235 de la figura 7.30.
b Calcula el valor de la energía de enlace total del núclido.

Naturaleza de la ciencia

Modelos, tendencias y discrepancias

La búsqueda de modelos en las medidas y observaciones es una de las mayores preocupaciones de los científicos, y en este capítulo hay dos ejemplos excelentes que hemos representado de forma gráfica: las figuras 7.14 y 7.30. Estas dos gráficas se presentan como resultados empíricos, sin antecedentes teóricos. Es obvio que debemos explicar estos modelos pero, incluso sin explicaciones, aportan la información necesaria para realizar predicciones muy útiles sobre la estabilidad de los núclidos. Otro ejemplo de su utilidad, si analizamos los modelos observados de estabilidad nuclear, son las siguientes conclusiones:

- Los núclidos que contienen números impares de protones y de neutrones son los menos estables.
- Los núclidos que contienen un número par, tanto de protones como de neutrones, son los más estables.
- Los núclidos que contienen un número impar de protones y un número par de neutrones son menos estables que los núclidos que contienen números pares de protones y números impares de neutrones.

Fisión nuclear y fusión nuclear

Fisión nuclear

La **fisión nuclear** es la separación de un núcleo pesado en dos núcleos más ligeros. Cuando se logra la fisión, va acompañada de la liberación de una gran cantidad de energía (la energía cinética de las partículas y la energía electromagnética de los fotones). Los dos núcleos recién formados son más estables que el núcleo inicial por el hecho de que tienen una mayor energía media de enlace por nucleón. Véase la Figura 7.31a.

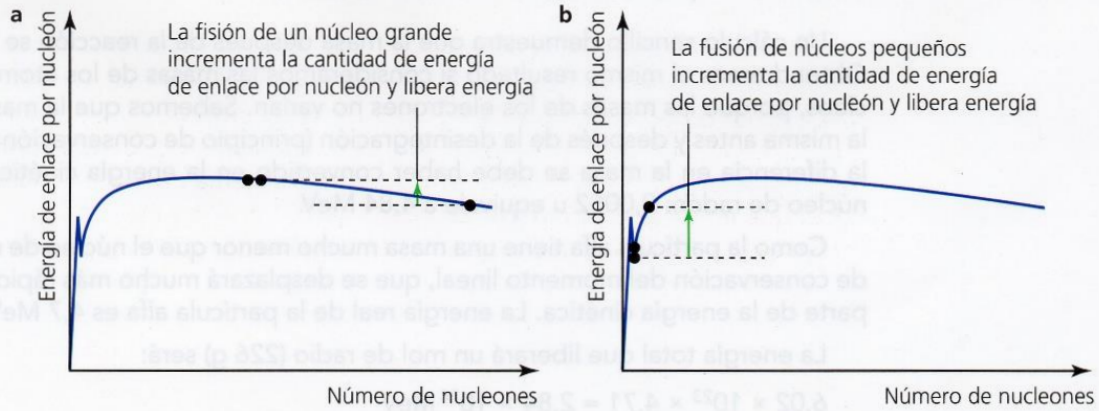


Figura 7.31 *Cualquier proceso nuclear que aumenta la cantidad de energía de enlace media por nucleón libera energía*

La reacción de fisión más habitual es la ruptura de núcleos de uranio-235 por bombardeo con neutrones de movimiento lento (neutrones térmicos). Como resultado, se captura un neutrón y se forma uranio-236, que es un núclido inestable que experimenta fácilmente una fisión. Esta es una reacción típica de fisión:

$$^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{236}_{92}U \rightarrow {}^{141}_{56}Ba + {}^{92}_{36}Kr + 3{}^{1}_{0}n + \text{fotones}$$

Los neutrones liberados los pueden absorber otros núcleos de uranio-235 e inducir otras reacciones de fisión. Los reactores de fisión nuclear utilizan la fisión *controlada* (véase el Capítulo 8), mientras que las bombas atómicas usan la fisión *descontrolada*.



Los riesgos asociados a la energía nuclear

Debido a los posibles riesgos que implica, el uso de la energía nuclear y el presumible desarrollo de las armas nucleares han sido un problema importante de ámbito mundial durante los últimos 70 años. La mayoría de la gente tiene opiniones muy firmes al respecto, y muy pocos países cuentan con políticas nucleares que puedan provocar desavenencias con sus vecinos y con otros países. En un mundo con una demanda siempre creciente de suministro de energía, la energía nuclear ofrece ventajas significativas, pero muchas personas consideran que los riesgos son demasiado elevados. De todo ello se deduce la necesidad de debates y colaboraciones internacionales para evitar conflictos, aunque la duda que se plantea es: ¿quién toma las decisiones finales? La energía nuclear se estudia con más detalle en el Capítulo 8.

Fusión nuclear

La **fusión nuclear** es la combinación de dos núcleos ligeros para crear un núcleo más pesado. En el proceso se libera energía. Como en la fisión, el núcleo recién formado es más estable que los dos núcleos iniciales, por el hecho de que tiene una mayor energía media de enlace por nucleón. Véase la Figura 7.31b.

Este es un ejemplo de reacción de fusión de dos núcleos de hidrógeno-2 (deuterio) en el que se crea un núcleo de helio-3:

$$^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He + {}^{1}_{0}n$$

Se necesitan temperaturas próximas a 10^8 kelvin para suministrar a los núcleos que se fusionan la energía cinética suficiente que les permite superar las fuerzas repulsivas. Los reactores de fusión nuclear experimentales utilizan la fusión nuclear controlada, pero no han conseguido crear una potencia de salida sostenible. Encontrarás más información al respecto en el Capítulo 8.

Cálculo de la energía liberada durante las reacciones nucleares

Desintegración radiactiva

Tomemos como ejemplo la desintegración alfa del radio-226. Asumiremos que la energía cinética del átomo de radio no es significativa.

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$$

Consideremos las masas de ambos miembros de esta ecuación:

- Masa en reposo del radio = 226,0254 u
- Masa en reposo del radón = 222,0176 u
- Masa en reposo de la partícula alfa = 4,0026 u

Un cálculo sencillo demuestra que la masa después de la reacción se ha reducido en 0,0052 u. Obtendremos el mismo resultado si consideramos las masas de los átomos o las masas de los núcleos, porque las masas de los electrones no varían. Sabemos que la masa–energía total debe ser la misma antes y después de la desintegración (principio de conservación de la energía), por lo que la diferencia en la masa se debe haber convertido en la energía cinética de la partícula alfa y el núcleo de radón: 0,0052 u equivale a 4,84 MeV.

Como la partícula alfa tiene una masa mucho menor que el núcleo de radio, sabemos, por la ley de conservación del momento lineal, que se desplazará mucho más rápido y transportará la mayor parte de la energía cinética. La energía real de la partícula alfa es 4,7 MeV.

La energía total que liberará un mol de radio (226 g) será:

$$6{,}02 \times 10^{23} \times 4{,}71 = 2{,}84 \times 10^{24}\,\text{MeV}$$

Esta es una cantidad muy elevada de energía ($4{,}54 \times 10^{11}$ J), pero recordemos que la energía se liberará durante un periodo muy largo porque la semivida del radio-226 es de unos 1600 años. Los radionúclidos pueden proporcionar energía durante periodos prolongados, pero no se utilizan generalmente para transferir grandes cantidades porque tienen poca potencia y son muy caros. Las fuentes alfa se pueden usar para generar pequeñas cantidades de energía eléctrica en lugares de difícil acceso, en las que resulta problemático sustituir la fuente de alimentación, como pueden ser los satélites y las sondas espaciales.

No obstante, existe otro tipo de reacción nuclear que es capaz de transferir grandes cantidades de energía rápidamente: la fisión nuclear.

Fisión nuclear

Consideremos como ejemplo la fisión del uranio-235 en núclidos de bario y criptón, igual que hemos hecho antes:

$$^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{236}_{92}U \rightarrow {}^{144}_{56}Ba + {}^{89}_{36}Kr + 3{}^{1}_{0}n + \text{fotones}$$

- Masa en reposo del neutrón = 1,0087 u
- Masa en reposo del uranio-235 = 235,0439 u
- Masa en reposo del bario-144 = 144,9229 u
- Masa en reposo del criptón-89 = 88,9178 u

Masa en reposo en el miembro izquierdo de la ecuación = 236,0526 u

Masa en reposo en el miembro derecho de la ecuación = 235,8668 u

Diferencia de masa = 0,1858 u

La diferencia de masa equivale a 173,1 MeV (0,1858 × 931,5). Esta cantidad de energía es la que se libera en cada fisión en forma de energía cinética de los núcleos y los neutrones generados, y en forma de fotones. En la fisión de un mol de núcleos de uranio-235 (235 g) se liberarán:

$$(173{,}1 \times 10^{6}) \times (6{,}02 \times 10^{23}) \times (1{,}6 \times 10^{-19}) = 1{,}7 \times 10^{13}\,\text{J}$$

Tal como explicaremos en el Capítulo 8, la liberación de esta cantidad de energía a partir de una cantidad tan pequeña de uranio se puede controlar. La energía se absorbe en su mayor parte en el interior de la fuente, que aumenta su temperatura, de modo que se puede producir vapor y usarlo para hacer girar las turbinas que generan electricidad.

Fusión nuclear

Tomaremos como ejemplo el de la reacción de fusión dada en la página anterior:

$$^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He + {}^{1}_{0}n$$

- Masa en reposo del hidrógeno-2 = 2,0141 u
- Masa en reposo del helio-3 = 3,0161 u
- Masa en reposo del neutrón = 1,0086 u

Masa en reposo en el miembro izquierdo de la ecuación = 4,0282 u

Masa en reposo en el miembro derecho de la ecuación = 4,0247 u

Diferencia de masa = 0,0035 u

La diferencia de masa equivale a 3,26 MeV (0,0035 × 931,5). Esta cantidad de energía es la que se libera en cada fusión en forma de energía cinética cuando se crean los núcleos y los neutrones. En la fusión de un mol de núcleos de hidrógeno-2 (2 g) se liberarán:

$$\frac{(3{,}26 \times 10^{6}) \times (6{,}02 \times 10^{23}) \times (1{,}6 \times 10^{-19})}{2} = 1{,}6 \times 10^{11}\,\text{J}$$

La energía que se libera en la fusión de un *kilogramo* de hidrógeno-2 es del mismo orden de magnitud que la que se libera en la fisión de un kilogramo de uranio-235.

Para que dos núcleos con carga positiva se puedan fusionar deben tener suficiente energía cinética para superar las fuerzas eléctricas repulsivas, y para ello se requieren temperaturas extremadamente altas. Se siguen realizando investigaciones en el campo de la tecnología que permitirán que esto suceda de una forma controlada y constante. Véase el Capítulo 8.

Aunque la fusión nuclear solo se ha conseguido durante periodos relativamente cortos en la Tierra, es la transferencia de energía que domina en las estrellas. La fusión del hidrógeno en helio es el origen de la energía radiada que liberan las estrellas, incluido el Sol. Véase la Opción D: Astrofísica.

42 El torio-227 se desintegra mediante emisión alfa en radio-223 (número de protones del torio = 90, masa del núcleo del torio = 227,0278 u, masa del núcleo del radón = 223,0186 u, masa de la partícula alfa = 4,0026 u).
- **a** Escribe una ecuación nuclear para esta desintegración.
- **b** Calcula la energía (en MeV) que se libera en la desintegración.

43 Usa los datos de la página anterior para confirmar que «la energía que se liberaría de la fusión de un kilogramo de hidrógeno-2 es del mismo orden de magnitud que la que se libera de la fisión de un kilogramo de uranio-235».

44 El radón-222 emite una partícula alfa con una energía de 5,49 MeV.
- **a** Calcula la velocidad de la partícula alfa.
- **b** Determina la velocidad del núcleo de radón inmediatamente después de la desintegración si asumimos que anteriormente estaba en reposo. (Masas: partícula alfa = $6{,}645 \times 10^{-27}$ kg, núcleo de radón = $3{,}687 \times 10^{-25}$ kg).

45 Una posible reacción que puede tener lugar en el núcleo de un reactor nuclear es:

$$^{235}_{92}\text{U} + {}^{1}_{0}\text{n} \rightarrow {}^{95}_{42}\text{Mo} + {}^{139}_{57}\text{La} + 2\,{}^{1}_{0}\text{n} + 7\,{}^{0}_{-1}\text{e}$$

(Masas: uranio-235, 235,123 u; molibdeno–95, 94,945 u; lantano–139, 138,955 u; neutrón, 1,009 u; 0,235 kg de uranio-235 contienen 6×10^{23} átomos; 1 u = 931,5 MeV). Para esta reacción de fisión, calcula:
- **a** la masa (en unidades de masa atómica) en cada miembro de la ecuación, (ignora la masa de los electrones)
- **b** el cambio en la masa (en unidades de masa atómica)
- **c** la energía liberada por fisión de un núcleo de uranio-235 (en MeV)
- **d** la energía disponible en la fisión de 0,100 g de uranio-235 (en julios).

46 A continuación se describen dos reacciones de fusión que tienen lugar en el Sol:
- Un núcleo de hidrógeno-2 absorbe un protón para formar un núcleo de helio-3.
- Dos núcleos de helio-3 se fusionan para formar un núcleo de helio-4 y dos protones libres.

Escribe la ecuación nuclear correcta para cada reacción nuclear y calcula la energía liberada en MeV.

(Masas: hidrógeno-2, 2,014110 u; helio-3, 3,01605 u; helio-4, 4,00260 u; protón, 1,00728 u y neutrón, 1,00867 u; 1 u = 931,5 MeV)

Perspectivas adicionales

Comparación entre las reacciones químicas y las reacciones nucleares

Se dice que hay una reacción nuclear cuando se produce algún cambio en el núcleo de un átomo. Las reacciones nucleares generan diferentes elementos si cambia el número de protones. Sin embargo, las reacciones químicas siempre producen sustancias nuevas, pero nunca implican cambios en los núcleos, por lo que no se crean elementos nuevos. Las reacciones químicas afectan a la reordenación de los electrones, de modo que normalmente se generan cantidades de energía más pequeñas que cuando se producen cambios nucleares. En las tasas de las reacciones químicas influyen la temperatura y los catalizadores, mientras que las tasas de las reacciones nucleares no se ven afectadas por esos factores o por la forma física de las sustancias que intervienen.

Ambos tipos de reacciones intervienen en la producción de energía nuclear. La extracción de uranio del suelo y los procesos de preparación del combustible para los reactores requieren cambios químicos, mientras que la fisión nuclear es obviamente una reacción nuclear.

1 Averigua por qué se necesita hexafluoruro de uranio para producir combustible nuclear.

2 Usa Internet para comparar (en orden de magnitud) la energía que se puede transferir cuando se quema 1 kg de petróleo en una central eléctrica convencional y cuando reacciona 1 kg de uranio-235 en una central nuclear.

7.3 La estructura de la materia

Se cree que toda la materia que nos rodea está compuesta por partículas que se denominan quarks y leptones. Se sabe que la materia tiene una estructura jerárquica en la que los quarks y leptones conforman los nucleones, los nucleones conforman los núcleos, los núcleos y los electrones conforman los átomos, y los átomos a su vez las moléculas. En esta estructura jerárquica, los quarks y los leptones son los componentes fundamentales de menor tamaño (10^{-18} m).

La naturaleza básica de la materia y las diferentes partículas que la componen (incluidas las fuerzas que actúan entre ellas) siempre ha sido un tema fundamental para los físicos. Con estos conocimientos, los científicos también pueden desarrollar y entender el origen del universo, además de hacer predicciones sobre cómo cambiará en el futuro. Este tipo de estudios ha sido una fuente de fascinación y motivación para muchas generaciones de científicos.

La estructura básica del átomo como protón–neutrón–electrón que destacamos al inicio de este capítulo se desarrolló a principios del siglo XX y sigue siendo la forma más común de visualización de un átomo. En esta sección final del capítulo expondremos cómo se ha perfeccionado este modelo a la luz de la evidencia experimental más reciente hasta el descubrimiento del bosón de Higgs en 2012, incluyéndolo. Pero comenzaremos la exposición con uno de los experimentos físicos más famosos, la serie de investigaciones que condujeron por primera vez al concepto de átomo con un núcleo central: el experimento de Geiger–Marsden.

El experimento de Geiger–Marsden

El método más utilizado para estudiar la estructura atómica consiste en dirigir un flujo de partículas diminutas que se mueven rápidamente hacia átomos más grandes para observar cómo los átomos y las partículas se ven afectados por las «colisiones» (si es el caso). Los modernos laboratorios de investigación nuclear aceleran las partículas cargadas mediante campos eléctricos para suministrarles toda la energía posible, antes de hacerlas colisionar con otras partículas. Esta rama de la física se conoce normalmente como *física de altas energías*.

Los primeros experimentos que investigaron la estructura del átomo se llevaron a cabo hace más de 100 años, pero en aquella época no se disponía de los aceleradores de partículas actuales y los haces de partículas energéticas que se utilizaban procedían de la desintegración radiactiva.

En 1909, Ernest Rutherford y dos de sus estudiantes investigadores, Geiger y Marsden, que trabajaban en la Universidad de Manchester, Reino Unido, dirigieron un haz de *partículas alfa* procedente de una fuente radiactiva hacia una lámina de oro *muy fina*. Alrededor de la lámina se movía un detector de sulfuro de zinc para determinar las direcciones en las que se desplazaban las partículas alfa después de chocar con la lámina (Figura 7.32). Las partículas alfa tienen suficiente energía para emitir un pequeño destello luminoso cuando las detiene el sulfuro de zinc.

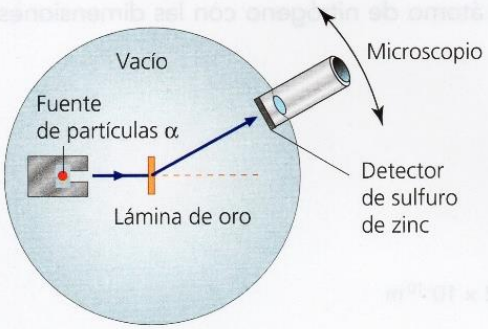


Figura 7.32
Experimento de dispersión de partículas alfa

Las partículas alfa transportan una cantidad de energía muy grande en relación con su pequeño tamaño y, en aquella época, se creía que las partículas alfa prácticamente no se verían afectadas cuando atravesaran esa fina lámina de oro. Se puede conseguir que una lámina de oro sea muy fina (menos de 10^{-6} m de espesor) y que tenga tan solo unas 3000 capas de átomos. Aunque las partículas alfa apenas se desplazan unos 4 cm en aire, encontrarían muchas más moléculas desplazándose por esa distancia en aire que atravesando los átomos de oro de la delgada lámina. Sin embargo, los resultados de Geiger y Marsden fueron sorprendentes.

Rutherford publicó los resultados en 1911 y estas fueron algunas de sus observaciones:

- la mayoría de las partículas alfa atravesaban la lámina con muy poca desviación o sin desviarse de su trayectoria original
- un pequeño número de partículas (aproximadamente 1 de cada 1800) se desviaba un ángulo superior a 10°
- un número extremadamente reducido de partículas (aproximadamente 1 de cada 10000) se desviaba un ángulo superior a 90°.

En aquella época, los físicos sabían que los átomos no eran partículas elementales porque contenían electrones y emitían radiación. Se sugirieron muchas teorías sobre la estructura atómica, pero sin resultados verdaderamente satisfactorios hasta que Rutherford tuvo la iniciativa de proponer el modelo nuclear del átomo.

Rutherford extrajo las siguientes conclusiones de los resultados del experimento de dispersión de partículas alfa:

- La mayor parte de la masa de un átomo está concentrada en un volumen muy pequeño en el centro del átomo. Por lo tanto, la mayoría de las partículas alfa atraviesan la lámina sin desviarse (continuando en línea recta) porque el átomo es en su mayor parte un espacio vacío.
- El centro (al que denominó *núcleo*) de un átomo debe estar cargado positivamente para poder repeler las partículas alfa que también tienen carga positiva. Las partículas alfa que pasan cerca de un núcleo experimentarán una fuerza repulsiva electrostática intensa, lo que provoca que cambien de dirección.
- Solo las partículas alfa que se aproximan mucho al núcleo, casi colisionando de frente, experimentarán una fuerza de repulsión electrostática suficientemente intensa como para desviarse de su trayectoria ángulos superiores a 90°. El hecho de que muy pocas partículas lo hicieran confirma que el núcleo es muy pequeño y que la mayor parte del átomo es un espacio vacío.

En la Figura 7.33 se representan algunas de las posibles trayectorias (rutas) de las partículas alfa. Rutherford usó su nuevo modelo nuclear y la ley del inverso del cuadrado de la distancia de Coulomb (que estudiamos en el Capítulo 5) para explicar la fuerza de repulsión entre las partículas con carga positiva. Usó las fuerzas para calcular la fracción de las partículas alfa que se esperaba que se desviaran siguiendo distintos ángulos. Los cálculos de Rutherford coincidieron en gran medida con los resultados del experimento, lo que respaldó su propuesta de un modelo nuclear del átomo.

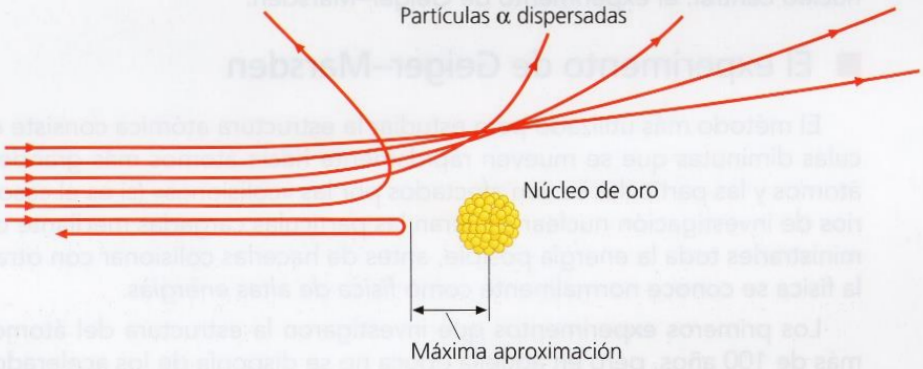


Figura 7.33
Trayectorias de las partículas alfa en el experimento de la lámina de oro

A partir de sus resultados, Rutherford calculó que el diámetro del núcleo es del orden de 10^{-15} m, en comparación con el diámetro del todo el átomo, que es de unos 10^{-10} m. En la Figura 7.34 se representan las características de un modelo nuclear de un átomo de nitrógeno con las dimensiones aproximadas.

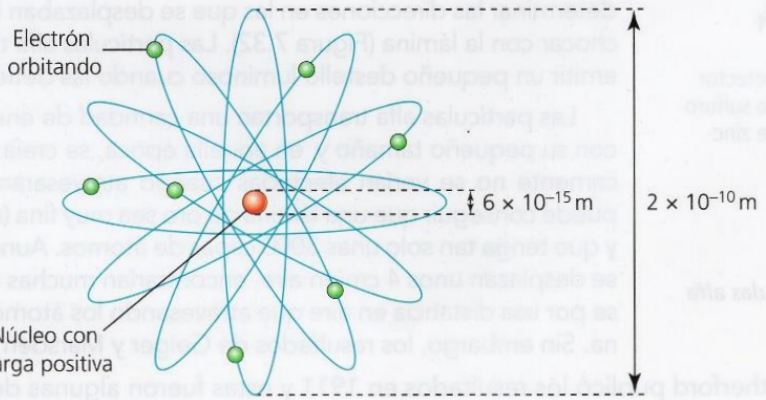


Figura 7.34
Estructura y dimensiones de un átomo de nitrógeno con siete electrones orbitando el núcleo con carga positiva. Observemos que el diámetro del átomo es al menos 30 000 veces más grande que el del núcleo

La dispersión de las partículas alfa se puede simular usando un sencillo aparato como el que se muestra en la Figura 7.35, en el que se hace rodar una pequeña bola por una rampa de madera en dirección a una «colina» de metal expresamente modelada. Se ha ideado con forma de colina porque, cuando se observa desde arriba, la bola se mueve como si el centro de la elevación la repeliera siguiendo la ley de repulsión del inverso del cuadrado de la distancia. Es decir, las fuerzas gravitatorias se usan como modelo de las fuerzas eléctricas. Con este aparato es posible investigar la dependencia de la dirección en la que viaja una bola después de descender la colina (el ángulo de dispersión) con respecto a su dirección inicial («error de puntería») y/o su energía. En el experimento de Geiger y Marsden no fue posible observar las trayectorias de dispersión de cada una de las partículas alfa, pero el modelo de dispersión observado con números elevados de partículas alfa en un haz parece encajar bastante con el modelo basado en bolas individuales que ruedan por colinas.

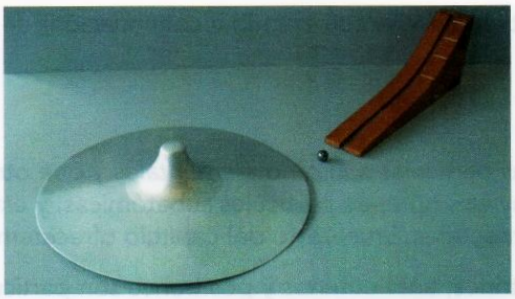


Figura 7.35
Mecanismo análogo de dispersión de partículas alfa

47 Explica en menos de 100 palabras (sin usar un diagrama) por qué Rutherford concluyó que los átomos contienen un núcleo central pequeño cargado positivamente.

48 **a** Dibuja un esquema de una partícula alfa que es desviada 90° por un núcleo de oro.
b En el mismo esquema dibuja la trayectoria de una partícula alfa (que se aproxima por la misma trayectoria que la anterior) y que es dispersada por un núcleo de cobre (que tiene un número inferior de protones).
c Muestra cómo se vería afectada una partícula alfa de mayor energía si se aproximara a un núcleo de oro siguiendo la misma trayectoria.

49 Una partícula alfa casi choca con un núcleo de oro y vuelve por la misma trayectoria. Dibuja una gráfica donde se represente la variación de la energía potencial eléctrica y la energía cinética de la partícula alfa respecto a la distancia de la partícula al núcleo de oro.

50 ¿Qué habría ocurrido si en el experimento de Rutherford se hubieran usado neutrones en lugar de partículas alfa? Argumenta la respuesta.

Perspectivas adicionales

El modelo de pudin de ciruela

El primer científico que propuso una estructura interna para el átomo fue Joseph John («J.J.») Thomson en 1904, unos años después de que descubriera que el electrón estaba cargado negativamente, por lo que era evidente que el átomo no era una partícula elemental indivisible. Según Thomson, un átomo estaba constituido por una esfera uniforme de carga positiva en la que se distribuían aleatoriamente numerosos electrones con carga negativa. Se conocía como el modelo de «pudin de ciruela» (Figura 7.36) y asumía que la masa y la carga positiva del átomo se repartían uniformemente por todo el átomo.

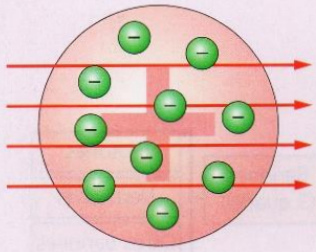


Figura 7.36
El modelo de «pudin de ciruela» de Thomson muestra que las partículas alfa no se desvían

El modelo de Thomson explicaba la neutralidad eléctrica del átomo, pero no se ajustaba a los resultados del experimento de Rutherford sobre la dispersión de las partículas alfa, que tuvo lugar unos años después. El modelo nuclear de Rutherford era un cambio de paradigma en la consideración de la estructura atómica y el modelo de Thomson se desechó.

Si este modelo hubiera sido correcto, la fuerza de dispersión máxima que experimentaría la partícula alfa cuando atravesara un átomo sería pequeña, porque las cargas positivas y negativas, así como la masa, están distribuidas de manera uniforme en la esfera del átomo. Las partículas alfa de alta energía atravesarían el átomo sin desviarse (Figura 7.36), tal como se había sugerido en un principio.

1 Explica por qué los resultados del experimento de dispersión de partículas alfa de Geiger y Marsden no respaldan el modelo de átomo de «pudin de ciruela» de Thomson.

Clasificación de las partículas

Hasta ahora en este capítulo hemos tratado las partículas subatómicas y la radiación siguientes:

- protones
- neutrones
- electrones
- neutrino electrónico
- fotones.

Y las antipartículas siguientes (véase el comentario a continuación):

- positrones
- antineutrinos electrónicos.

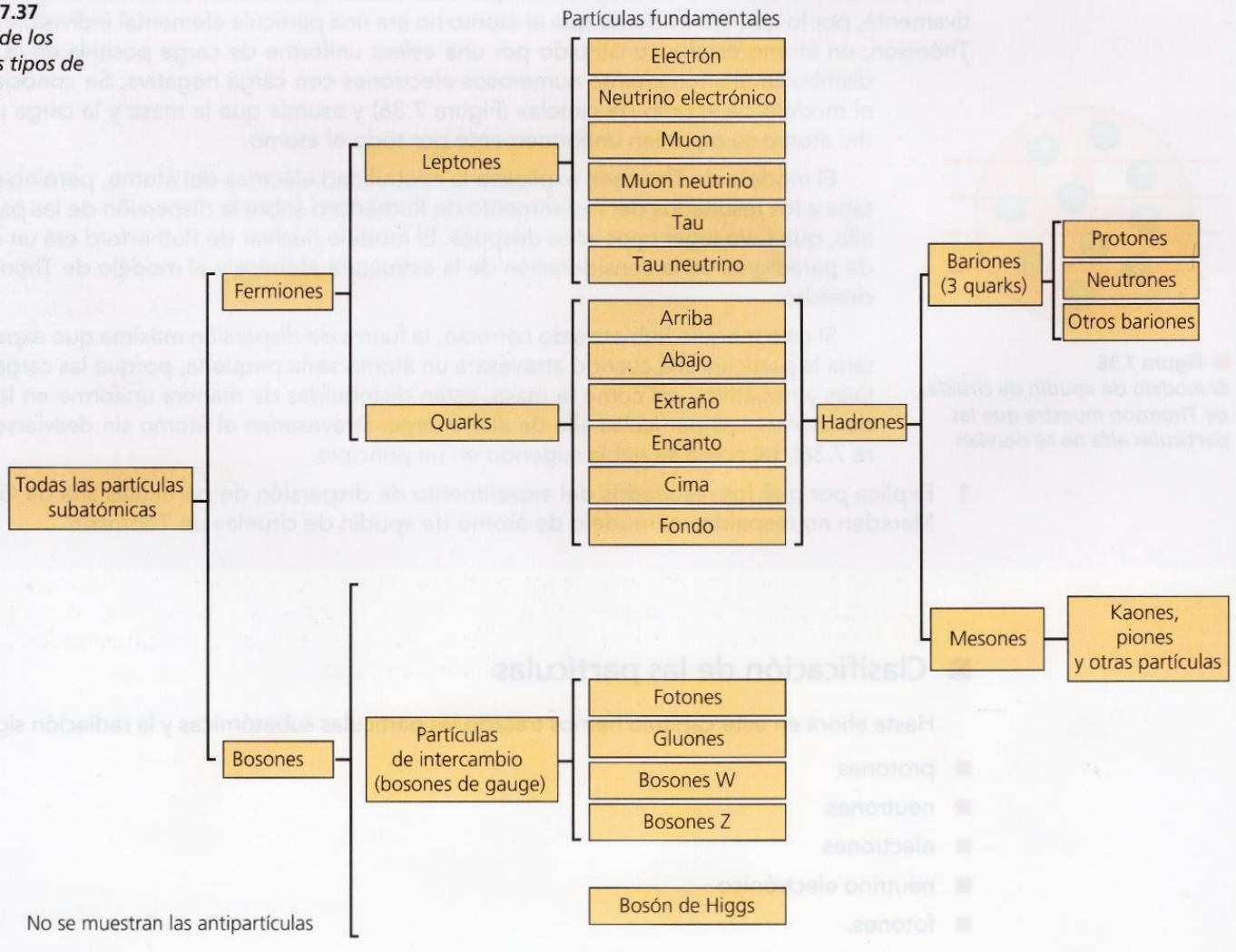
Ahora explicaremos si estas partículas son o no *elementales* y qué otro tipo de partículas contiene el interior del átomo. Hay tres tipos de partículas subatómicas, y esta es la base del **modelo estándar** de las partículas elementales. En el resto del capítulo ofreceremos más información.

- **Leptones**: electrones, neutrinos, antineutrinos y positrones son partículas de poca masa conocidas como leptones. Estas partículas nunca se han separado en otras más pequeñas y se comportan como partículas fundamentales puntuales. Se conocen como **partículas elementales** porque no tienen una estructura interna detectable. Dos o más partículas elementales del mismo tipo, por ejemplo, dos electrones, son completamente idénticas.
- **Quarks**: el protón y el neutrón *no* son partículas elementales. Están formadas por partículas elementales más pequeñas conocidas como quarks, y como tales, son ejemplos de **partículas compuestas**.
- **Partículas de intercambio**: también conocidas como *bosones de gauge*. Según veremos, las cuatro fuerzas fundamentales (interacciones) que detallamos en la Sección 7.1 se pueden explicar por el intercambio de partículas. Por ejemplo, el fotón es responsable de la interacción electromagnética.

Dentro de estas tres clasificaciones hay un número elevado de partículas no elementales, compuestas, de las cuales solo mencionamos algunas en este libro. La mayoría solo se pueden crear en laboratorios de física de partículas de alta energía y, o bien es difícil detectarlas, o tienen una vida corta (se desintegran rápidamente en otras partículas), o ambas cosas a la vez. No hay necesidad de recordar sus nombres específicos o sus propiedades.

Los nombres de los diferentes tipos de partículas subatómicas pueden ser confusos. Para tener una referencia más clara, en la Figura 7.37 se resumen los nombres que se usarán en el resto del capítulo.

Figura 7.37 *Nombres de los diferentes tipos de partículas*



Partículas y antipartículas

Para cada partícula subatómica hay una **antipartícula** que tiene la misma masa que la partícula, pero carga opuesta (si es que tiene carga) y número cuántico opuesto (véase la página 322).

Por ejemplo, el electrón, e^-, tiene carga negativa, mientras que su antipartícula, el positrón, e^+, tiene carga positiva. El nombre de otras antipartículas se indica con una barra sobre el símbolo de la partícula. No obstante, en algunos casos, las partículas y sus antipartículas coinciden: por ejemplo, el fotón es su propia antipartícula.

El positrón fue la primera antipartícula que se descubrió (en 1932) cuando se observó que un campo magnético desviaba una partícula con la masa de un electrón en dirección opuesta (a la del electrón). El antiprotón no se descubrió hasta 20 años después.

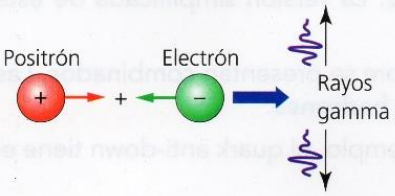


Figura 7.38
Aniquilación de un par electrón-positrón

La **antimateria** es la materia que está formada por antipartículas. Si la antimateria entra en contacto con la materia, ambas se **aniquilan** (Figura 7.38), y toda la masa se convierte en energía (según la fórmula $E = mc^2$). Por ejemplo, en una colisión de un electrón y un positrón se crean dos fotones de alta energía (rayos gamma). El proceso inverso también es posible y es un ejemplo de *producción de pares* (véase la página 517).

Las teorías de la física de partículas, que se basan en que la simetría es perfecta, predicen que el universo original después del Big Bang contendría igual número de partículas que de antipartículas. Sin embargo, actualmente los físicos se decantan por un universo que contiene en su mayor parte materia y muy poca antimateria, aunque los motivos todavía se desconocen.

Quarks, leptones y sus antipartículas

Quarks

Al final de la década de 1960 ya se había identificado un número elevado de partículas subatómicas diferentes, y los físicos se cuestionaban si eran todas elementales o estaban constituidas por un número muy inferior de partículas más pequeñas combinadas de diferentes maneras. Murray Gell-Mann (véase la Figura 7.39) y George Zweig propusieron la existencia de quarks en 1964, pero su descubrimiento no se confirmó hasta unos diez años después, cuando la dispersión de electrones de alta energía fuera de los nucleones sugería que los protones y los neutrones tenían algún tipo de estructura interna y, por lo tanto, *no* eran elementales.



Figura 7.39
Murray Gell-Mann

El término «quark» se extrajo de la obra del escritor irlandés James Joyce titulada *Finnegan's Wake*, publicada en 1939. En esa época solo se habían propuesto tres quarks:

Three quarks for Muster Mark!
Sure he has not got much of a bark
And sure any he has it's all beside the mark.

Para poder explicar las propiedades de las partículas compuestas que contienen quarks se necesitan seis tipos diferentes, o **sabores**, de quarks. Se les ha asignado el nombre de *up (arriba)*, *down (abajo)*, *strange (extraño)*, *charm (encanto)*, *bottom (fondo)* y *top (cima)*. El *sabor* de los quarks no tiene ninguna otra finalidad que la de distinguirlos (Tabla 7.6).

Los seis tipos de quarks tienen una carga eléctrica de $\frac{1}{3}$ o $\frac{2}{3}$ del módulo de la carga de un electrón, e.

Tabla 7.6 *Propiedades de los quarks*

Sabor	Símbolo	Carga eléctrica	Número bariónico	Extrañezas
arriba	u	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0
abajo	d	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0
extraño	s	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$	−1
encanto	c	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0
fondo	b	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0
cima	t	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0

El número bariónico y la extrañeza se explican más adelante. La versión simplificada de esta tabla figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Los quarks *nunca* se encuentran como partículas libres, *siempre* se presentan combinados. Las partículas formadas por combinaciones de quarks se denominan **hadrones**.

Los *antiquarks* tienen carga opuesta a la de los quarks. Por ejemplo, el quark anti-down tiene el símbolo $\bar{d}$ y carga $+\frac{1}{3}e$.

Los quarks up (arriba) y down (abajo) son por lo general estables (aunque intervienen en la desintegración beta), y son con diferencia los quarks más comunes del universo, mientras que los quarks charm (encanto), strange, (extraño) top (cima) y bottom (fondo) solo se pueden generar en colisiones de alta energía (como las que intervienen en los *rayos cósmicos* y los *aceleradores de partículas*). Durante el resto del capítulo, para simplificar, solo hablaremos de los quarks up (arriba), down (abajo) y strange (extraño). Sin embargo, merece la pena mencionar que el quark top (cima) es la partícula subatómica más pesada que se ha observado nunca. Su masa es casi tan pesada como un átomo entero de oro y junto con el recién descubierto bosón de Higgs es una de las partículas elementales que más atención acapara.

El concepto de **extrañeza** se introdujo cuando se observó que algunos mesones (véase a continuación) tenían propiedades «extrañas» (tardaban en desintegrarse mucho más de lo esperado). Este comportamiento inusual se explicó posteriormente con la proposición de que la partícula contenía un tipo diferente de quark: un *quark strange* (*extraño*). El concepto de extrañeza tiene una enorme importancia desde una perspectiva histórica, pero no es más esencial que cualquiera de los otros sabores, de modo que podemos hablar igualmente de profundidad, encanto, etc.

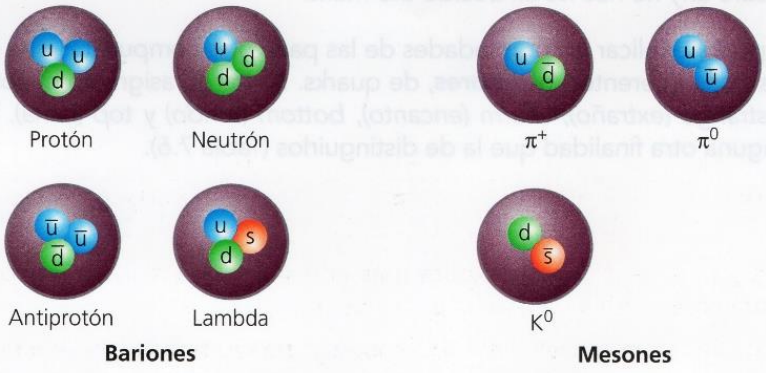
Hadrones, bariones y mesones

Hay dos tipos de hadrones (partículas que contienen quarks): los bariones y los mesones.

Bariones

Los bariones contienen tres quarks. Un *protón* es un barión compuesto por dos quarks up (arriba) y un quark down (abajo) (uud), por lo que su carga total es $+e$. Un *neutrón* es un barión compuesto por dos quarks down (abajo) y un quark up (arriba) (udd), por lo que no tiene carga global. Véase la Figura 7.40.

Figura 7.40 *Combinaciones de quarks en algunos bariones y mesones*



Pero existen otros bariones además de los protones y los neutrones. Por ejemplo, la partícula *lambda cero* contiene un quark up (arriba), un quark down (abajo) y un quark strange (extraño) (uds). Esta partícula no tiene carga y su valor de extrañeza es –1 (lo que significa que contiene un quark strange).

Mesones

Un **mesón** es la combinación de un quark y un antiquark. Por ejemplo, el mesón π^+ (*pion*) es una combinación de un quark up (arriba) y un antiquark down (abajo) ($u\bar{d}$). Véase la Figura 7.40. Tiene una carga de +1*e*. Su antipartícula, el mesón π^-, contiene un quark down (abajo) y un antiquark up (arriba) ($\bar{u}d$).

Un *kaón* K^0 es un mesón que contiene un quark antistrange (antiextraño) ($d\bar{s}$). No tiene carga y su valor de extrañeza es +1 (lo que significa que contiene un quark antistrange).

Los mesones solo se crean en interacciones de alta energía con la materia. Sus vidas útiles antes de desintegrarse son cortas.

Confinamiento

El hecho de que los quarks solo se encuentren combinados formando hadrones y no existan nunca como partículas libres se conoce como **confinamiento de los quarks**.

Para explicar este fenómeno debemos considerar la naturaleza de la fuerza intensa entre dos quarks: esta fuerza *no* varía considerablemente con la distancia (a diferencia de otras fuerzas, que disminuyen con la distancia; por ejemplo, la fuerza eléctrica entre dos cargas se reduce obedeciendo la ley del inverso del cuadrado de la distancia). Esto significa que el trabajo (= fuerza × distancia) que habría que hacer para separar completamente los quarks sería infinito. Si se suministra una gran cantidad de energía a los dos quarks, existe la posibilidad de que la energía se convierta en masa y de que se forme otro par de quarks. En otras palabras, la energía que se suministra para intentar separarlos genera un par quark-antiquark mucho antes de que estén a la distancia suficiente como para observarlos por separado.

51 Resume la diferencia fundamental que existe entre bariones y mesones.

52 Indica cuál es la estructura de quarks de:
a un antiprotón
b un antineutrón.

53 Utiliza Internet para determinar la estructura de los mesones eta.

54 Cuando un protón colisiona con un pion negativo ($\bar{u}d$), se forma un neutrón y otra partícula.
a ¿Cuál es la estructura de quarks de la otra partícula?
b ¿Qué suposición has hecho?

Leptones

Hay seis leptones: el **electrón** y su **neutrino**, el **muon** y su neutrino, y el **tau** y su neutrino. Véase la Tabla 7.7.

Tabla 7.7 *Propiedades de los leptones*

Leptón	Símbolo	Carga eléctrica/*e*	Masa en reposo (MeV c^{-2})	Número leptónico
electrón	e^-	–1	0,511	1
neutrino electrónico	ν_e	0	muy pequeña, no confirmada	1
muon	μ^-	–1	106	1
muon neutrino	ν_μ	0	muy pequeña, no confirmada	1
tau	τ^-	–1	1780	1
tau neutrino	ν_τ	0	muy pequeña, no confirmada	1

El número de leptones se explica más adelante (página 322). La versión simplificada de esta tabla figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Los tres neutrinos del electrón, del muon y del tau tienen masas muy pequeñas. El muon está presente en los rayos cósmicos, pero el tau solo se ha detectado en colisiones de alta energía en un colisionador de partículas. El muon es inestable y se desintegra rápidamente en un electrón, un

antineutrino electrónico y el neutrino del muon. El electrón es el portador de carga en conductores metálicos y semiconductores. Los neutrinos electrónicos se forman durante la desintegración beta positiva, tal como hemos visto ya en este capítulo.

Leyes de conservación de la carga, número bariónico, número leptónico y extrañeza

Las partículas pueden tener una gran variedad de propiedades. Además de la equivalencia entre masa y energía, ya hemos hecho referencia a la carga, el sabor y el spin. En cualquier desintegración o interacción de partículas, muchas de estas propiedades se conservan. Este es un principio similar al de conservación de los números de protones y nucleones en la desintegración radiactiva.

Los **números cuánticos** se utilizan para describir los valores cuantizados de las cantidades que se conservan:

- El número cuántico de la *carga*, $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{3}$, 1, $1\frac{1}{3}$ ... siempre se conserva.
- El **número bariónico** cuántico es el número de bariones y siempre se conserva (los antibariones tienen un número bariónico de –1). El número bariónico de los quarks es $\frac{1}{3}$.
- El **número leptónico** cuántico es el número de leptones y siempre se conserva (los antileptones tienen un número leptónico de –1).
- La extrañeza se conserva en las interacciones electromagnéticas y las interacciones fuertes, pero no siempre en las interacciones débiles. Todos los quarks tienen extrañeza 0, excepto el quark strange (extraño) (–1).

Ejemplo resuelto

14 Aplica las leyes de conservación a las interacciones posibles siguientes:
a $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
b $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$

a Número bariónico: 1 = 1 + 0 + 0
Número leptónico: 0 = 0 + 1 + (–1)
Carga: 0 = 1 + (–1) + 0
Extrañeza: 0 = 0 + 0 + 0

Se cumplen las leyes de conservación, por lo que la interacción puede suceder. Es una desintegración radiactiva beta negativa.

b Número bariónico: 0 = 0 + 0
Número leptónico: 0 = 0 + 0
Carga: 0 = 1 + (–1)
Extrañeza: 1 = 0 + 0
La extrañeza no se conserva, por lo que la interacción no puede suceder.

55 Un kaón neutro ($d\bar{s}$) puede interactuar con un protón para crear un kaón positivo ($u\bar{s}$) y otra partícula, *x*:
$K^0 + p \rightarrow K^+ + x$
Deduce la naturaleza de *x*.

56 Usa las reglas de conservación para determinar si son posibles las reacciones nucleares siguientes. Investiga las propiedades de las partículas cuando lo consideres necesario.
a $n + p \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_e$
b $p + \bar{p} \rightarrow \pi^- + \pi^+$
c $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$
d $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$
e $\pi^0 + n \rightarrow K^+ + \Sigma^+$

Naturaleza y alcance de la fuerza nuclear fuerte, la fuerza nuclear débil y la fuerza electromagnética

En este capítulo ya hemos estudiado las cuatro interacciones fundamentales, que quedan resumidas en la Tabla 7.8. (La interacciones débil y electromagnética en ocasiones se consideran combinadas en la *interacción electrodébil*).

Tabla 7.8
Las cuatro interacciones fundamentales

Interacción fundamental	Actúa sobre	Magnitud relativa aproximada	Alcance/m	Partícula de intercambio
nuclear fuerte	quarks y gluones	1	10^{-15}	gluón (g)
electromagnética	todas las partículas cargadas	10^{-2}	infinito, pero se reduce con la ley del inverso del cuadrado	fotón (γ)
nuclear débil	quarks y leptones	10^{-6}	10^{-18}	bosones W o Z
gravitatoria	todas las masas	10^{-38} (no significativa para partículas individuales)	infinito, pero se reduce con la ley del inverso del cuadrado	gravitón (hipotético)

La versión simplificada de esta tabla figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Partículas de intercambio

En el nivel fundamental de la física de partículas, las fuerzas se explican en términos de transferencia de **partículas de intercambio** (**bosones de gauge**) entre las dos partículas que experimentan la fuerza.

Por ejemplo, hay una fuerza entre dos partículas cargadas porque se intercambian un fotón. El fotón es la partícula de intercambio de la interacción electromagnética.

Podemos comenzar a explicar las partículas de intercambio con un ejemplo cotidiano como el siguiente. Consideremos la Figura 7.41. La fuerza hacia delante que se debe hacer para lanzar la pelota desde A hasta B es igual y opuesta a la fuerza hacia atrás en A. Si la chica que está en B coge la pelota, habrá una fuerza hacia atrás que actuará sobre ella. Es decir, el intercambio de la pelota tiene como consecuencia que A y B se «repelen». Si volvemos a lanzar la pelota, el proceso se repite. En caso de que la pelota fuera invisible, simplemente observaríamos que las barcas se repelen.



Figura 7.41
En el intercambio de una pelota intervienen fuerzas

Este ejemplo macroscópico difiere bastante de la acción de las partículas de intercambio en las interacciones fundamentales y no explica fácilmente las fuerzas de atracción (algunos libros usan el ejemplo del bumerán). Sin embargo, el ejemplo gráfico nos ayuda a entenderlo.

Los físicos creen que las interacciones fundamentales suceden debido al intercambio de partículas. Estos intercambios son muy rápidos y no se pueden observar, por lo que las partículas de intercambio se suelen describir como **partículas virtuales**.

El corto alcance de las fuerzas nucleares se puede explicar si las partículas virtuales tienen una vida limitada y no tienen tiempo suficiente para transferirse entre las otras dos partículas a menos que estén muy juntas. (El principio de incertidumbre de Heisenberg explica por qué puede ocurrir. Lo explicaremos en el Capítulo 12).

57 Sugiere cómo la analogía del bumerán puede ayudar a explicar las fuerzas de atracción entre las partículas.

58 Indica las fuerzas fundamentales que actúan sobre los:
- **a** protones
- **b** neutrones
- **c** electrones
- **d** quarks
- **e** leptones.

59 Según la Tabla 7.8, el cociente entre las fuerzas electromagnéticas y la fuerza gravitatoria es aproximadamente 10^{-2} entre 10^{-38}. Como ejemplo, calcula la fuerza eléctrica entre un protón y un electrón separados por una distancia de 5×10^{-11} m, y compárala con la fuerza gravitatoria entre las mismas dos partículas.

60 Describe las características fundamentales que diferencian la fuerza nuclear fuerte de la fuerza electromagnética.

El Modelo Estándar

El Modelo Estándar de la física de partículas es un marco teórico que refleja el conocimiento científico actual del mundo subatómico. El modelo ha tenido un gran éxito a la hora de reflejar la mayoría de los fenómenos subatómicos observados, pero se cree que está inacabado. Por ejemplo, la gravedad no se puede incorporar al modelo y también hay otras carencias teóricas. Como resultado, los experimentos de alta energía actuales se centran en intentar descubrir la física que hay más allá del Modelo Estándar.

En la Figura 7.42 se ha representando un gráfico del Modelo Estándar de partículas elementales. La simplicidad del gráfico no refleja fielmente todos los esfuerzos que lo precedieron: ha sido necesario un número considerable de trabajos de investigación, tanto experimentales como teóricos, en muchos países durante los últimos 50 años, para llegar hasta aquí. En los últimos experimentos de colisión de partículas la cantidad de datos generados fue enorme, lo que ha requerido una gran potencia de cálculo para su análisis. Sin embargo, muchas preguntas siguen sin respuesta, como, ¿dónde encaja la gravedad en este modelo?, ¿qué es la materia oscura (del espacio)? y ¿por qué el universo está formado en su mayoría por materia y no por antimateria? El gráfico también incluye el bosón de Higgs, que se explicará más tarde.

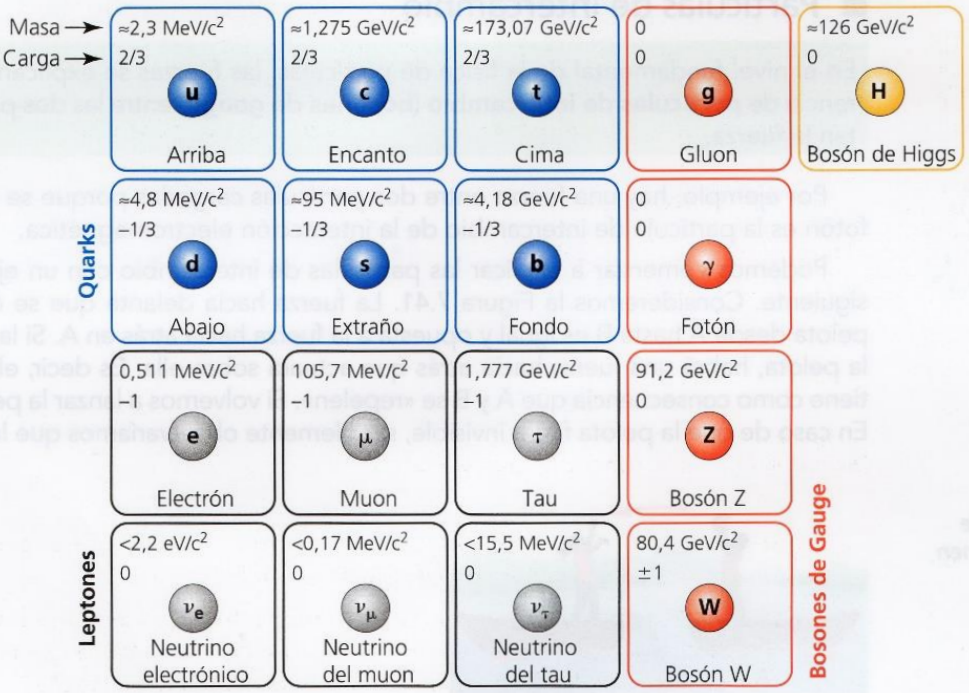


Figura 7.42
El Modelo Estándar de física atómica

Naturaleza de la ciencia

Predicciones: la creencia en la «sencillez»

El concepto de un modelo protón–neutrón–electrón para los átomos era de una simplicidad elegante, por lo que el descubrimiento de un número tan elevado de partículas subatómicas fue problemático para los físicos, que tendían a creer que la naturaleza fundamental de la ciencia implica que la estructura del universo sea «sencilla» y esté compuesta de un número relativamente pequeño de partículas (y fuerzas) elementales.

A pesar de los cientos de partículas que se han descubierto y teorizado, siempre se ha asumido que en su gran mayoría *no* eran fundamentales y que debía haber una sencillez subyacente en espera de confirmación. Esta creencia se ha recuperado con el desarrollo del Modelo Estándar.

El Modelo Estándar también refleja la creencia de los científicos en la importancia de la *simetría*. Por ejemplo, hay cargas positivas y negativas, partículas y antipartículas, así como seis leptones y seis bariones.

Enlace con la teoría del conocimiento

La contribución de la física al conocimiento humano

¿Creer en la existencia de las partículas fundamentales justifica que se considere a la física más importante que otras áreas del conocimiento?

Son las personas las que deben decidir si lo que eligen creer es importante, pero la comprensión de la estructura de la materia y del universo es, sin duda alguna, de un interés intrínseco considerable para la mayoría, y dicha comprensión es innegablemente básica y fundamental. La ciencia, sin embargo, ha progresado hasta un nivel en el que todo este conocimiento no se puede asimilar si no se tiene una formación científica, y para muchas personas la ciencia avanzada está totalmente desconectada de su vida cotidiana.

Por supuesto que es posible argumentar que la aplicación de otras áreas del conocimiento científico (la medicina, por ejemplo) es más «importante» porque influyen directamente en la calidad de nuestra vida diaria. Debemos añadir que no conocemos los beneficios que pueden aportar las investigaciones físicas de alta energía; por ejemplo, el CERN desempeñó un papel fundamental en el desarrollo de Internet.

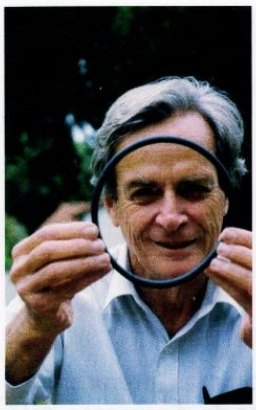


Figura 7.43
Richard Feynman: «Tengo respuestas aproximadas, creencias posibles y distintos grados de certeza sobre distintas cosas, pero no estoy absolutamente seguro de nada»

Los diagramas de Feynman

Los diagramas de Feynman son una forma de visualizar todas las interacciones de las partículas *elementales* usando un **vértice** (o dos o más *vértices*).

La Figura 7.44 es un ejemplo sencillo. El vértice es el punto que se encuentra en el centro del diagrama.

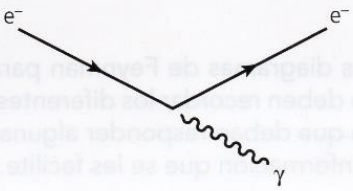


Figura 7.44
Diagrama de Feynman de una interacción sencilla

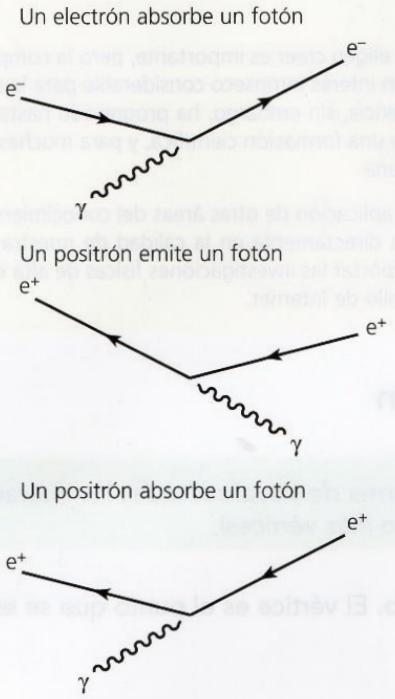
- El área a la izquierda del vértice representa el escenario antes de la interacción y el área de la derecha representa el escenario *después* de la interacción.
- Las partículas observables se representan mediante líneas rectas con flechas que señalan hacia la derecha. Las antipartículas se representan con flechas hacia la izquierda, aunque se considera que *todas las partículas se mueven siempre de izquierda a derecha.*
- Siempre hay una flecha que señala hacia un vértice y una flecha que señala hacia fuera.
- Las partículas de intercambio inobservables se representan mediante líneas curvas, sin flechas.
- El cambio en la orientación de una línea significa que el movimiento de la partícula ha cambiado.
- Un vértice une dos líneas rectas y normalmente una línea curva.
- Las leyes de conservación se pueden aplicar a la interacción que se representa mediante un único vértice.

Con esta información podemos ver que el vértice de la Figura 7.44 representa un electrón que emite una partícula de intercambio (un fotón) y cambia de dirección.

Es importante entender que estos diagramas *no* representan la disposición espacial de las partículas o los vectores de una colisión. Los diagramas de Feynman no son gráficas desplazamiento–tiempo, sino la simplificación de un complejo tratamiento matemático de las interacciones de las partículas inobservables, que no se incluye en el curso de IB.

En este libro representamos el incremento de tiempo de *izquierda* a *derecha*, pero en otros textos se puede representar de *abajo* hacia *arriba*. Puedes comprobarlo fácilmente observando el sentido hacia el que señalan las flechas.

Los diagramas de Feynman son una herramienta muy útil a la hora de representar, analizar y predecir las interacciones entre las partículas. Los diagramas de las Figura 7.45 muestran algunas variaciones de la Figura 7.44. A pesar de sus similitudes obvias, representan distintas situaciones.

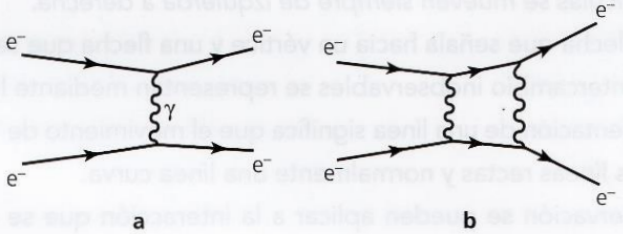


■ **Figura 7.45**
Vértices de un electrón y de un positrón

Ahora ampliaremos la explicación de los diagramas de Feynman para incluir las interacciones entre distintas partículas. Los estudiantes no deben recordar los diferentes tipos de diagramas, solo tendrán que saber interpretarlos en caso de que deban responder alguna pregunta en un examen, o dibujar diagramas sencillos a partir de la información que se les facilite.

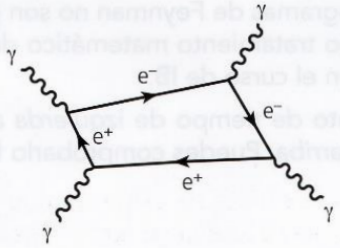
Ejemplos de diagramas de Feynman

En la Figura 7.46 se representa una posible interacción entre dos electrones, que previamente habríamos interpretado como la repulsión eléctrica entre cargas similares. Sin embargo, se podrían dibujar muchos otros diagramas de Feynman para conseguir el mismo resultado que la repulsión total entre los dos electrones. Un ejemplo es el que se representa en la Figura 7.46b. Se necesitaría un completo análisis matemático para considerar todas las posibilidades.



■ **Figura 7.46**
Dos diagramas de Feynman para la dispersión electrón–electrón

En la Figura 7.47 se representa una interacción en la que dos fotones se repelen debido al intercambio de electrones y positrones.



■ **Figura 7.47**
Un diagrama de Feynman para la dispersión fotón–fotón

La Figura 7.48a muestra la aniquilación de un par electrón-positrón. (Se trata de un ejemplo poco habitual, normalmente se crean dos fotones). En la Figura 7.48b se representa la creación del par.

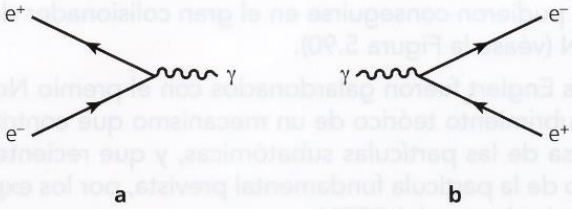


Figura 7.48 *Aniquilación y producción de un par*

En la Figura 7.49a se muestra un diagrama de Feynman que representa la desintegración beta negativa, mientras que la Figura 7.49b es la representación de una partícula.

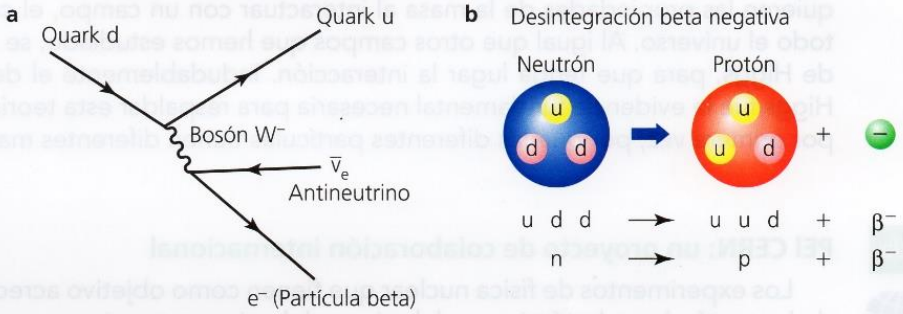


Figura 7.49 *Desintegración beta negativa*

En la Figura 7.50 se muestra la formación de un par quark–antiquark en el que interviene la partícula de intercambio de fuerza nuclear fuerte, el gluon.

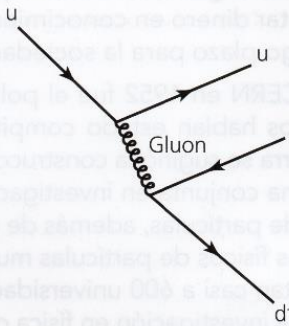


Figura 7.50 *Intercambio de un gluon en la formación de quarks*

61 Dibuja un diagrama de Feynman que represente la desintegración beta positiva, en la que interviene un bosón W^+.

62 Busca información sobre el significado de la «vía óctuple».

Bosón de Higgs



Figura 7.51 *François Englert y Peter Higgs*

Varios físicos propusieron por primera vez la existencia del bosón de Higgs, una partícula elemental, a inicios de la década de 1960, pero no se identificó hasta 50 años después, el 4 de julio de 2012.

Ese día se descubrió una partícula con las propiedades correctas (la única partícula elemental con carga cero y spin cero) y con una alta proporción energía-masa de 126 $GeVc^{-2}$ (135 u). La búsqueda del bosón de Higgs se prolongó tanto porque requería energías de partículas extremadamente elevadas que solo pudieron conseguirse en el gran colisionador de hadrones (LHC, por sus siglas en ingles) del CERN (véase la Figura 5.90).

Peter Higgs y François Englert fueron galardonados con el premio Nobel de Física en Oslo en el año 2013 «por el descubrimiento teórico de un mecanismo que contribuye a nuestra comprensión del origen de la masa de las partículas subatómicas, y que recientemente fue confirmado a través del descubrimiento de la partícula fundamental prevista, por los experimentos ATLAS y CMS en el gran colisionador de hadrones del CERN».

La partícula de Higgs era el enlace perdido del Modelo Estándar, y la importancia de su hallazgo se reflejó en los titulares de la prensa e Internet.

Higgs y sus colegas propusieron que las partículas no tienen una masa intrínseca, sino que adquieren las propiedades de la masa al interactuar con un campo, el **campo de Higgs**, que ocupa todo el universo. Al igual que otros campos que hemos estudiado, se necesita un bosón, el bosón de Higgs, para que tenga lugar la interacción. Indudablemente el descubrimiento del bosón de Higgs fue la evidencia fundamental necesaria para respaldar esta teoría revolucionaria que explica, por primera vez, por qué las diferentes partículas tienen diferentes masas.

Naturaleza de la ciencia

El CERN: un proyecto de colaboración internacional

Los experimentos de física nuclear que tienen como objetivo acrecentar nuestro conocimiento de las partículas subatómicas y del origen del universo requieren energías de partículas cada vez mayores que solo se pueden conseguir mediante aceleradores de partículas extremadamente costosos como el del CERN. La colaboración de los distintos países ha sido realmente beneficiosa para compartir el conocimiento y los costes, pero la asignación de sumas considerables a la investigación nuclear es un tema controvertido. Mucha gente considera que los países tienen otras prioridades (necesidades sociales) que la de gastar dinero en conocimiento científico especializado que puede, o no, tener algún beneficio a largo plazo para la sociedad.

Uno de los motivos del establecimiento del CERN en 1952 fue el político. Durante la Segunda Guerra Mundial, científicos e ingenieros europeos habían estado compitiendo para desarrollar la bomba y los misiles nucleares. Después de la guerra se sugirió la construcción de un centro europeo en el que los científicos pudieran trabajar de forma conjunta en investigaciones no militares. El personal del CERN diseña y construye aceleradores de partículas, además de ayudar a preparar, llevar a cabo, analizar e interpretar datos de experimentos físicos de partículas muy complejos. La mitad de los físicos de partículas del mundo, que representan casi a 600 universidades y 100 nacionalidades, visitan el CERN para realizar sus investigaciones. La investigación en física de partículas y el descubrimiento de nuevas partículas se intensificaron con la **colaboración** nacional e internacional a gran escala. Los aceleradores de partículas grandes, como el gran colisionador de hadrones del CERN resultan tan caros que solo se pueden accionar con la contribución de muchos países.

Selección de preguntas de examen

Hoja 1 Preguntas del IB y preguntas tipo IB

1 ¿Por qué un campo magnético intenso no puede desviar los rayos gamma?

A. No tienen masa.
B. El poder de ionización de los rayos gamma es débil.
C. El poder de penetración de los rayos gamma es fuerte.
D. Son eléctricamente neutros.

2 Una muestra recién preparada contiene 40 μg del isótopo de yodo-131. La semivida del yodo-131 es de 8 días. ¿Cuál de las siguientes respuestas es la mejor estimación de la masa de yodo-131 que queda después de 24 días?

A. 10 μg
B. 13 μg
C. 5 μg
D. cero

3 Un núcleo captura dos neutrones. ¿Cuál de las siguientes opciones indica los cambios que se producen en el número de protones y el número de nucleones del núcleo?

	Número de protones	Número de nucleones
A.	no se modifica	no se modifica
B.	no se modifica	aumenta 2 unidades
C.	aumenta 2 unidades	no se modifica
D.	aumenta 2 unidades	aumenta 2 unidades

4 ¿Qué partícula es X en la reacción de fusión siguiente?

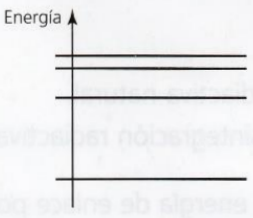
$${}^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow 2\,{}^{4}_{2}\mathrm{He} + \mathrm{X}$$

A. un protón
B. un electrón (partícula beta)
C. una partícula alfa
D. un neutrón.

5 La energía de enlace de un núcleo de helio-3 se define como:

A. la energía que se libera cuando se forma un núcleo de helio-3 a partir de sus constituyentes individuales
B. la energía que se libera cuando un núcleo de helio-3 se separa en sus constituyentes individuales
C. la energía total de los protones dentro del núcleo de helio-3
D. la energía total del núcleo de helio-3.

6 En el diagrama se muestran cuatro posibles niveles de energía de un electrón en el átomo de hidrógeno.



El número de frecuencias distintas del espectro de emisión del hidrógeno atómico que se originan de las transiciones del electrón entre estos niveles es:

A. 0
B. 2
C. 4
D. 6

7 La radiación emitida cuando un electrón cambia de niveles de energía en un átomo tiene una longitud de onda de 6×10^{-7} m. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones describe correctamente este cambio de energía?

A. El electrón se desplaza a un nivel de energía superior dentro del átomo.
B. La frecuencia de la radiación emitida es 2×10^{-15} Hz.
C. La energía del fotón emitido es de unos 3×10^{-19} J.
D. 3×10^{-19} J equivalen aproximadamente a 0,5 eV.

8 ¿Cuál de las siguientes afirmaciones sobre las partículas subatómicas es correcta?

A. Los protones, neutrones y electrones son partículas elementales.
B. Los electrones pertenecen a un clase de partículas denominadas leptones.
C. Las fuerzas electromagnéticas se explican por el intercambio de unas partículas llamadas gluones.
D. Tanto los protones como los neutrones contienen dos quarks.

9 El Modelo Estándar contempla tres clases de partículas, que son:

A. hadrones, leptones y quarks
B. hadrones, leptones y bosones de intercambio
C. hadrones, quarks y bosones de intercambio
D. leptones, quarks y bosones de intercambio.

10 ¿Cuál de las siguientes opciones no es un número cuántico que se conserva en algunas, o todas, las reacciones nucleares?

A. masa **B.** número bariónico **C.** carga **D.** extrañeza

11 ¿Cuál de las siguientes opciones acerca de la desintegración beta negativa ($\beta-$) es verdadera?

A. Se absorbe un antineutrino.
B. La carga del núclido hijo es menor que la del núclido padre.
C. Se emite un antineutrino.
D. El número másico del núclido hijo es menor que el del núclido padre.

© IB Organization

12 En el experimento de Geiger-Marsden los núcleos de oro dispersan las partículas α. Los resultados experimentales ofrecen la evidencia de que:

A. Las partículas α tienen cantidades discretas de energía cinética.
B. La mayor parte de la masa y la carga positiva de un átomo está concentrada en un volumen pequeño.
C. El núcleo contiene protones y neutrones.
D. Los átomos de oro tienen una energía de enlace fuerte por nucleón.

© IB Organization

13 La fuerza que mantiene unidos a los protones y los neutrones en el núcleo es:

A. la fuerza electrostática
B. la fuerza gravitatoria
C. la fuerza nuclear débil
D. la fuerza nuclear fuerte.

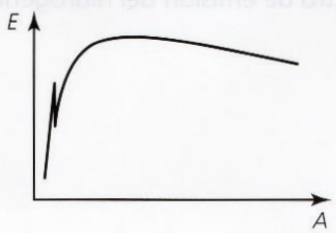
© IB Organization

Hoja 2 Preguntas del IB y preguntas tipo IB

1 a i. Describe el fenómeno de la desintegración radiactiva natural. (3)

ii. La radiación ionizante se emite durante la desintegración radiactiva. Explica el significado del término *ionizante*. (2)

b El boceto de la gráfica muestra la variación de la energía de enlace por nucleón E de los núcleos con el número másico (número de nucleones) A.



Una de las reacciones nucleares que se pueden producir cuando se bombardea uranio-235 con un neutrón para formar xenón-142 y estroncio-90 se representa así:

$$^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{142}_{54}Xe + {}^{90}_{38}Sr + 4{}^{1}_{0}n$$

i. Identifica el tipo de reacción nuclear que se representa arriba. (1)

ii. Copia la gráfica anterior e identifica en ella las posiciones aproximadas de los núcleos del uranio (U), el xenón (Xe) y el estroncio (Sr) con sus símbolos. (2)

iii. A continuación se facilitan los datos de las energías de enlace del xenón-142 y el estroncio-90.

Isótopo	Energía de enlace/MeV
xenón-142	1 189
estroncio-90	784,8

La energía total liberada durante la reacción es 187,9 MeV. Determina la energía de enlace por nucleón de uranio-235. (2)

iv. Explica por qué no se incluye la energía de enlace de los neutrones que se forman en la reacción. (1)

2 Un núcleo estacionario de radón-220 ($^{220}_{86}Rn$) experimenta una desintegración α y forma un núcleo de polonio (Po). La partícula α tiene una energía cinética de 6,29 MeV.

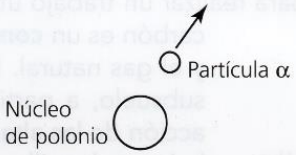
a i. Completa la ecuación nuclear de esta desintegración. (2)

$$^{220}_{86}Rn \rightarrow Po +$$

ii. Calcula la energía cinética, en julios, de la partícula α. (2)

iii. Deduce que la velocidad de la partícula α es $1{,}74 \times 10^{7}$ m s^{-1}. (1)

El siguiente diagrama muestra la partícula α y el núcleo de polonio inmediatamente después de la desintegración. Indicamos la dirección y el sentido de la velocidad de la partícula α.



b i. Copia el diagrama anterior y dibuja una flecha que señale la dirección inicial del movimiento del núcleo de polonio inmediatamente después de la desintegración. (1)

ii. Determina la velocidad del núcleo de polonio justo después de la desintegración. (3)

iii. En la desintegración de otro núcleo de radón, el núcleo se mueve antes de la desintegración. Sin realizar ningún otro cálculo, sugiere el efecto, si es el caso, de esta velocidad inicial en las trayectorias del apartado **b i**. (2)

La semivida de la desintegración del radón-220 es 55 s.

c i. Explica por qué no es posible determinar un tiempo para la vida del núcleo de radón-220. (2)

ii. Define *semivida*. (2)

© IB Organization

8 Producción de energía

IDEAS FUNDAMENTALES

- La constante necesidad de nuevas fuentes de energía implica la toma de decisiones que pueden tener un grave efecto en el medio ambiente. La cantidad limitada de combustibles de origen fósil y su implicación en el calentamiento global ha propiciado el desarrollo de fuentes de energía alternativas, un área de innovación tecnológica que sigue evolucionando rápidamente.
- Con la finalidad de crear un modelo simplificado, la Tierra se puede considerar un radiador de cuerpo negro y la atmósfera, un cuerpo gris.

8.1 Fuentes de energía

La constante necesidad de nuevas fuentes de energía implica la toma de decisiones que pueden tener un grave efecto en el medio ambiente. La cantidad limitada de combustibles de origen fósil y su implicación en el calentamiento global ha propiciado el desarrollo de fuentes de energía alternativas, un área de innovación tecnológica que sigue evolucionando rápidamente

Los datos relativos al uso de las fuentes de energía en todo el mundo cambian con el tiempo y su fiabilidad puede variar, por lo que las cifras que se mencionan en todo este capítulo son solo orientativas y debemos asumir que su exactitud es cuestionable. Aconsejamos que los estudiantes consulten sitios web acreditados para obtener información actualizada.

El término **combustible** se usa de forma generalizada para hacer referencia a cualquier sustancia cuya energía procedente de los cambios en sus átomos y moléculas (es decir, su energía química o nuclear) se utiliza para realizar un trabajo útil. Algunos ejemplos son el carbón y el uranio. El carbón es un **combustible de origen fósil**, al igual que el petróleo y el gas natural. Los combustibles de origen fósil se forman en el subsuelo, a partir de plantas y criaturas marinas muertas, por la acción de las altas presiones y temperaturas (en ausencia de aire) a lo largo de millones de años. Como deben transcurrir muchos años para su formación, y aunque los procesos que originan los combustibles de origen fósil siguen teniendo lugar en la actualidad, se conocen como **fuentes de energía no renovables**: las usamos a un ritmo muy superior al que se forman.

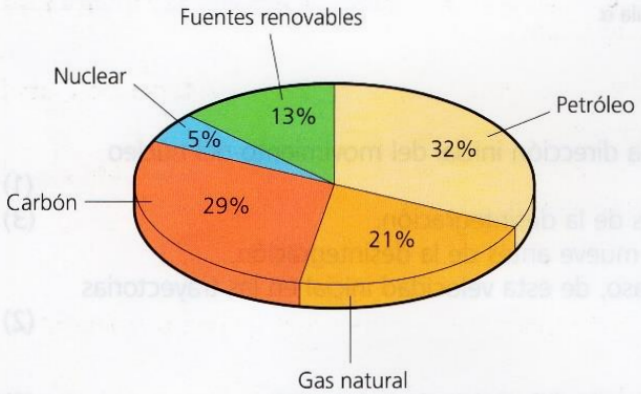


Figura 8.1
La proporción de las diferentes fuentes de energía y su contribución al consumo total de energía en el mundo

Durante 2012 el consumo de energía primaria en todo el mundo fue aproximadamente de $5{,}5 \times 10^{20}$ J. Aunque esta cifra no se puede conocer con total exactitud, supone un consumo medio de energía global de más de 2000 W por persona en nuestro planeta. Obviamente, se trata solo de un promedio y no tiene en cuenta las enormes diferencias en el consumo de energía entre los países más ricos y los más pobres. Esta cifra incluye la energía que se usa para el transporte, la industria y la generación de electricidad, pero no incluye el uso de recursos individuales a pequeña escala, como la leña. Aproximadamente una cuarta parte de la población de la Tierra no tiene electricidad en sus hogares. En ocasiones las cifras que se dan en los sitios webs o en los libros pueden ser engañosas si solo tienen en cuenta las fuentes de energía que se usan para generar electricidad.

En la Figura 8.1 se representa la proporción de las distintas fuentes de energía que se usan en todo el mundo.

- Los **combustibles de origen fósil** aportan el 82% del total de la energía que se consume en el mundo. Los productos derivados del crudo son los más utilizados (32%), seguidos del carbón y del gas natural (metano) con un 29% y un 21%, respectivamente. A pesar de las ventajas considerables del uso de los combustibles de origen fósil, podemos citar al menos dos inconvenientes: liberan dióxido de carbono durante su combustión (lo que con toda certeza lleva al cambio climático) y no son renovables (véase la página 333).
- La **energía nuclear** aporta aproximadamente el 5% de la energía total que se consume en el mundo. También se trata de una fuente de energía no renovable.
- Las **fuentes de energía renovables** suministran cerca del 13% de la energía total que se consume a nivel mundial.

Todos los países necesitan suministros de combustible para mantener el nivel de vida de sus habitantes, pero como la mayoría de países no tienen suficientes recursos energéticos, tienen que importarlos de otros que tienen excedentes energéticos. Esta situación exige cooperación y acuerdos internacionales entre países si se quieren evitar conflictos, y posiblemente guerras.

Cualquier amenaza sobre los suministros de combustible internacionales puede tener un efecto inmediato y dramático en la economía mundial; el precio de un barril de petróleo en los mercados internacionales es un indicador financiero importante que afecta al precio de otros muchos artículos que consumimos.

Fuentes de energía primaria

Una **fuente de energía primaria** es una forma de energía disponible en la naturaleza y que no ha sido nunca procesada. Por ejemplo, el crudo es una fuente de energía primaria.

Cuando una fuente primaria se convierte en otra fuente de mayor utilidad se describe como **fuente de energía secundaria**. Por ejemplo, los combustibles obtenidos a partir del refinamiento del crudo, el plutonio obtenido a partir del uranio o la generación de electricidad.

La fuente original de la mayor parte de la energía que se consume en la Tierra procede del Sol. Las plantas obtienen la energía directamente de la radiación solar, y las plantas y los animales que murieron hace cientos de millones de años son el origen de los combustibles de origen fósil. El viento y la lluvia son el resultado de los cambios de temperatura provocados por la radiación solar, y las olas se forman con el viento.

Las principales fuentes anteriormente mencionadas que no obtienen su energía del Sol son la energía nuclear (que procede de los cambios que se producen en los núcleos de los átomos) y la energía geotérmica (procedente de la radioactividad, que también se origina en los cambios nucleares). Un tercer ejemplo es la energía mareomotriz, que se crea a partir de ligeros cambios en la energía potencial gravitatoria del sistema Tierra-Luna-Sol.

Ventajas e inconvenientes de las diferentes fuentes de energía

Los factores más importantes que hay que tener en cuenta a la hora de discutir las ventajas y los inconvenientes de las distintas fuentes de energía son:

- las emisiones de gases de efecto invernadero y sus posibles efectos en el calentamiento global
- los riesgos para la salud o la vida del ser humano
- la posible contaminación y los efectos ambientales, incluidos los problemas provocados por el transporte y el almacenamiento de los combustibles y los residuos
- si la fuente es renovable o no renovable
- el coste económico
- la cantidad de energía que se puede transferir a partir de una masa dada (o de un volumen) de la fuente
- si la energía está continuamente disponible o depende de factores como las condiciones atmosféricas y la hora del día o la noche.

Fuentes de energía renovables y no renovables

Una **fuente de energía renovable** se reemplaza continuamente mediante procesos naturales y no se agota (extingue o desaparece). Seguirá estando disponible para que la usemos durante mucho tiempo.

El viento y la lluvia, por ejemplo, siempre estarán disponibles, mientras la energía procedente del Sol caliente el planeta. Las principales fuentes renovables son:

- la biomasa o los biocombustibles (energía transferida a partir de la madera y otras plantas, y también de los desechos animales)
- la hidroelectricidad
- el calentamiento solar
- la energía eólica
- la energía geotérmica (energía transferida por las rocas a altas temperaturas del subsuelo)
- la células fotovoltaicas
- la energía de las olas (energía undimotriz).



Figura 8.2
En Brasil se usa una gran cantidad de etanol (que se obtiene del azúcar de caña) como combustible

Esta lista refleja el orden (decreciente) aproximado del uso de energía total. La energía hidroeléctrica es la fuente de energía renovable que más se usa para generar electricidad. Se trata de tecnologías de rápido desarrollo, de las que podemos encontrar información actualizada en Internet.

Se dice que una fuente de energía **no es renovable** cuando no se puede reemplazar una vez se ha agotado y, por lo tanto, se acabará (agotará) en algún momento en un futuro no muy lejano. Las principales fuentes de energía no renovables son:

- los combustibles de origen fósil
- la energía nuclear.

Energía específica y densidad de energía de las fuentes de combustible

Es útil conocer cuánta energía se puede transferir a partir de una determinada cantidad de combustible con el objetivo de comparar los diferentes combustibles. Este dato se puede determinar en un laboratorio quemando una masa o volumen conocidos de combustible, y transfiriendo la energía térmica resultante para elevar la temperatura de una masa conocida de agua. (Recuerda que $Q = mc\Delta T$). En la Figura 8.3 se representa cómo un químico podría reproducir este método rápidamente para un combustible líquido, aunque este método simple no es muy exacto (los estudiantes deben poder explicar el motivo a partir de lo aprendido en el Capítulo 3).

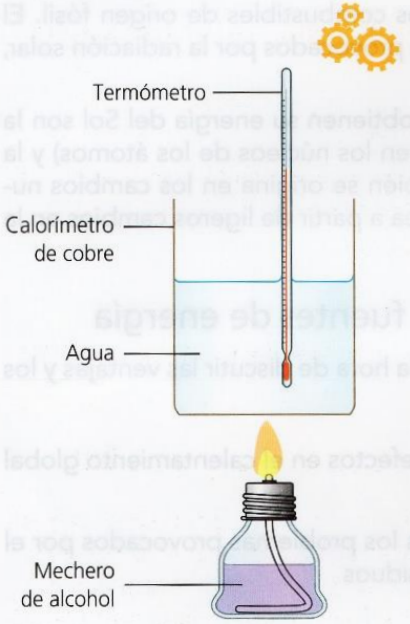


Figura 8.3
Estimación de la densidad de energía o la energía específica de un combustible

Energía específica = energía transferida por unidad de masa. Unidad: J kg^{-1}

Densidad de energía = energía transferida por unidad del volumen. Unidad: J m^{-3}

Para muchas fuentes de energía renovables, como la energía eólica, puede que no sea apropiado referirse a un valor numérico de densidad de energía, aunque se puede afirmar en términos generales que la energía eólica tiene una densidad de energía baja porque se requiere un área de terreno relativamente grande para conseguir una potencia de salida moderada.

Una de las grandes ventajas de la energía nuclear es su elevada energía específica (y densidad de energía). De todos los combustibles de origen fósil, el gas natural (metano) es el que tiene la energía específica más alta.

Si usamos un combustible con una energía específica alta, necesitaremos menos masa de ese combustible para suministrar una determinada cantidad de energía que si usamos otro con una energía específica menor. En la Tabla 8.1 se incluyen algunos ejemplos.

Tabla 8.1
Energías específicas

Material	Energía específica/MJ kg^{-1}
fusión nuclear (de deuterio y tritio)	340000000
uranio usado en reactores nucleares	83000000
hidrógeno	143
gas natural (metano)	55
gasolina/petróleo	46
crudo	46
aceite vegetal	42
etanol	30
carbón	28
madera	17
carbohidratos típicos (alimentos)	17
estiércol de vaca	15
residuos domésticos	9
pilas de linternas	0,1
agua a una altura de 100 m	0,001

1 En un experimento similar al que se muestra en la Figura 8.3, cuando se queman 1,24 cm^3 de combustible en el aire, la temperatura de 54,8 g de agua se eleva de 18,0 °C a 83,4 °C. (El calor específico del agua es de 4180 $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$).
   a Calcula el valor de la densidad de energía del combustible.
   b ¿Esperabas que este valor fuera mayor o menor que el de tu respuesta? Explícalo.

2 Un país tiene 46 millones de habitantes y un consumo total de energía de $5,2 \times 10^{18}$ J en un año.
   a Calcula el consumo medio de energía por habitante en un año.
   b ¿Cuál es el consumo medio de potencia por habitante?
   c Si en cada hogar viven 2,8 personas en promedio y el consumo energético total es de 2,7 W, ¿qué porcentaje del consumo de energía del país tiene lugar en los hogares?
   d ¿En qué crees que se utiliza el resto de la energía?

3 a ¿Cuánta gasolina se necesita para acelerar un coche de 1500 kg que está en reposo hasta una velocidad de 20 $m\ s^{-1}$ si la eficiencia global del proceso es del 32%?
   b Determina la tasa a la que el mismo coche consume gasolina si viaja a una velocidad constante de 20 $m\ s^{-1}$ y la fuerza de resistencia total es de 2000 N.
   c ¿Cuál es la energía específica de la pila de una linterna que contiene 7,9 g de productos químicos que suministran la suficiente energía para mantener encendida una bombilla de 0,85 W durante 110 minutos?

4 Una central térmica de carbón tiene una eficiencia del 36% y una potencia de salida de 312 MW.
   a Calcula la masa de carbón que se quema en la combustión:
      i cada segundo
      ii cada semana.
   b ¿Aproximadamente, cuánto uranio se necesitaría cada semana para una central nuclear con la misma potencia de salida pero una eficiencia del 42%?

5 a Averigua qué países del mundo tienen los consumos medios de energía más altos (por persona).
   b ¿Qué posibles motivos tienen los habitantes de esos países para usar tanta energía?

6 Indica en qué podría diferir una lista de las fuentes de energía que se usan en la generación de energía eléctrica a gran escala de una lista de las fuentes de energía globales que se usan en el mundo.

7 Busca en Internet las cifras actualizadas del uso de fuentes de energía renovable:
   a a nivel mundial
   b en tu país.

8 ¿En qué circunstancias sería más útil referirse a la densidad de energía de un combustible que a su energía específica?

La electricidad como una forma de energía secundaria y versátil

No fue hasta finales del siglo XIX cuando los avances en la ciencia y la tecnología hicieron posible la construcción de centrales eléctricas que, a partir de combustibles, generaran electricidad para un gran número de personas (véase la Figura 8.11). Con anterioridad, se utilizaba carbón y madera para las calefacciones, y gas, aceite o velas para la iluminación. Incluso actualmente la mitad de la población mundial todavía utiliza madera local u otros materiales vegetales y animales para obtener parte, o la mayor parte, de su energía.

En un periodo de algo más de 130 años la mayor parte del mundo ha experimentado una completa transformación con el uso generalizado de la electricidad. Estos son algunos de los motivos:

- en las centrales eléctricas se pueden generar grandes cantidades de energía eléctrica de forma rápida y económica
- las corrientes eléctricas pueden transferir energía de forma eficiente allí donde se necesita gracias a los hilos y cables metálicos
- se han inventado una gran variedad de dispositivos que transfieren la energía eléctrica a otras formas de energía muy útiles.

Sin embargo, la corriente eléctrica se debe generar cuando se necesita. No se puede almacenar directamente.

Naturaleza de la ciencia

Todos los avances científicos tienen riesgos asociados

La electricidad ha transformado el mundo como resultado de la colaboración entre generaciones de científicos e ingenieros de todo el mundo a gran escala. (Sin embargo, todavía queda un largo camino por recorrer para lograr el acceso universal a la electricidad, ya que se estima que aproximadamente 1200 millones de personas todavía no tienen electricidad en sus hogares). Todo

esto ha tenido graves consecuencias, porque los recursos de la Tierra se han visto mermados; y el cambio climático y la contaminación son una clara amenaza para nuestro planeta. Sin embargo, la verdadera naturaleza de la ciencia es resolver los problemas, especialmente cuando, con la esperanza de facilitar energía de bajo coste y respetuosa con el medio ambiente, es posible obtener a cambio importantes ventajas financieras.

Seguro que el científico que llevó a cabo las primeras investigaciones sobre la electricidad nunca soñó con el alcance que tendrían sus descubrimientos durante los siguientes 200 años. Las consecuencias totales de cualquier desarrollo científico o tecnológico son a menudo imprevisibles, pero cuando las hay, se puede argumentar que parte del papel que desempeña el científico es realizar y presentar un análisis de riesgos y beneficios, y no solo perseguir el conocimiento independientemente de las implicaciones. En caso de duda, actualmente se acepta en general que los científicos deben convencer a sus colegas, y al público, de que ninguna de sus acciones o investigaciones intencionadas pueden ser dañinas de modo alguno. (A esto se le denomina «**principio de precaución**»). Aunque debemos admitir, por la propia naturaleza de la ciencia y la impredecibilidad de las investigaciones, que es un objetivo difícil de conseguir.

El uso de los recursos energéticos para generar electricidad en las centrales eléctricas

La mayoría de las centrales eléctricas que producen electricidad transfieren la energía a partir de los combustibles de origen fósil o de las reacciones de fisión de los combustibles nucleares. La energía térmica se usa para aumentar la temperatura del agua que hay en una caldera, que se transforma en vapor de alta presión. El vapor acciona la rotación de las turbinas, tal como se muestra en la Figura 8.4, que están conectadas a bobinas. La *inducción electromagnética* que se genera (Capítulo 11) produce energía eléctrica cuando las bobinas giran en campos magnéticos intensos. Cuando el vapor sale de la turbina, se enfría, lo que provoca que se condense, y el agua se bombea de nuevo a la caldera. En la Figura 8.5 se representa de forma simplificada el funcionamiento de una central eléctrica de combustible fósil.

Las mismas ideas básicas se aplican en *todas* las centrales eléctricas que transfieren energía a partir de un combustible para generar electricidad mediante un flujo de energía térmica. Las máquinas que funcionan mediante un flujo de energía térmica se denominan **motores térmicos**, y como ejemplos podemos citar las centrales eléctricas, los automóviles, los aviones y los trenes.



Figura 8.4
Una turbina que se usa para generar electricidad

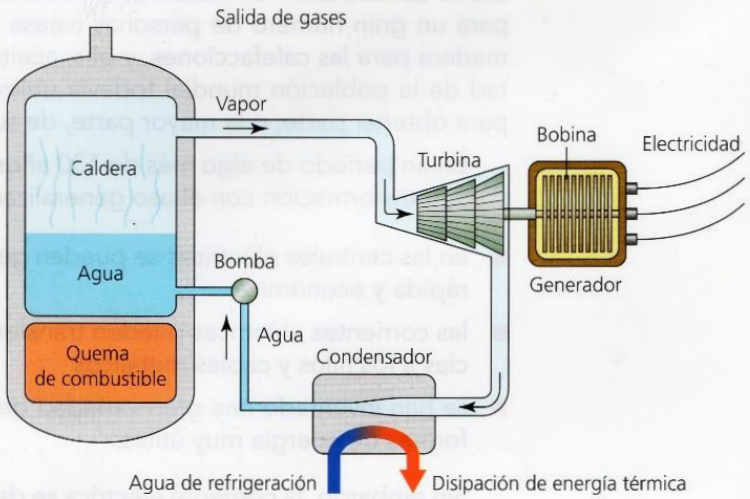


Figura 8.5
Esquema de una central eléctrica de combustible fósil

Conversiones de energía y degradación de energía

Cuando hay una diferencia de temperatura entre dos lugares, la energía térmica fluye entre ellos, y este principio es el que utilizan los motores térmicos. Parte de esa energía térmica generada se puede utilizar para realizar trabajo útil, por ejemplo para hacer girar unas turbinas con la finalidad de producir electricidad. En la Figura 8.6 se ilustra el principio con un ejemplo en el que, por cada 100 J de energía que fluye entre una zona «caliente» y otra «fría», se pueden usar 30 J para

realizar trabajo útil, mientras que los 70 J de energía restantes se transfieren a la zona fría desde donde se propaga al entorno (al medio ambiente). Obviamente, 30 J + 70 J = 100 J por la ley de la conservación de la energía. La eficiencia de este proceso es 30/100 = 0,3 o 30%.

La energía que se propaga al entorno (**se disipa**) no se puede recuperar para realizar ningún trabajo útil y se conoce como **energía degradada**.

La eficiencia máxima de una central eléctrica para producir electricidad es del 35% (una cifra decepcionantemente baja), lo que significa que el 65% de la energía que se obtiene del combustible se degrada y se transfiere al entorno de la central. Nuestro objetivo es que las centrales eléctricas sean lo más eficientes posibles y, por lo tanto, es importante entender por qué la energía se degrada. Como vimos en el Capítulo 2, en todos los procesos mecánicos la fricción implica disipación de energía, pero esta *no* es la causa principal de la falta de eficiencia de las centrales eléctricas.

Consideremos el siguiente ejemplo simplificado para comprender la poca eficiencia de todos los motores térmicos. En la Figura 8.7, se suministra energía térmica al gas sellado en el interior de un cilindro. La presión que se va incrementando dentro del cilindro fuerza que el pistón (que asumimos sin fricción) se mueva hacia la derecha. En este ejemplo es posible, en teoría, que toda la energía térmica que se suministra al gas se convierta en energía cinética del pistón en movimiento. El sistema puede tener una eficiencia del 100%.

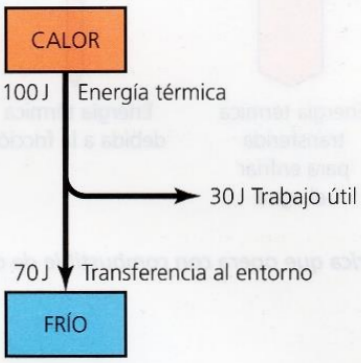


Figura 8.6
La energía fluye entre el «calor» y el «frío»

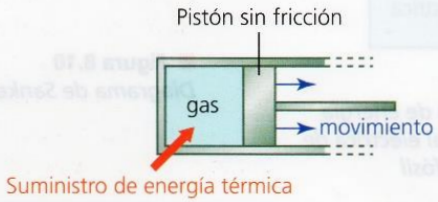


Figura 8.7
Trabajo que se ejerce en un pistón

Sin embargo, el gas que se calienta en un cilindro no se puede expandir de manera indefinida, lo que significa que cualquier motor térmico funcional implica un proceso que se repite una y otra vez para que pueda trabajar continuamente. Un motor térmico funcional debe trabajar en *ciclos* dentro de un espacio restringido en el que a una expansión le suceda una compresión, que a su vez sea sucedida por una expansión, etc. Sin embargo, no es posible que se produzca un proceso cíclico sin que se transfiera energía térmica al entorno (fuera del sistema), y este es el principal motivo por el que las centrales eléctricas son tan ineficientes. La eficiencia de una central eléctrica (o de cualquier otro motor térmico) mejora con el suministro de temperaturas más elevadas y con la salida de temperaturas más bajas.

Diagramas de Sankey

Las transformaciones de energía se pueden representar de forma útil en diagramas de flujo como el de la Figura 8.8. Esta es otra forma de representar una situación sencilla como la que se ha

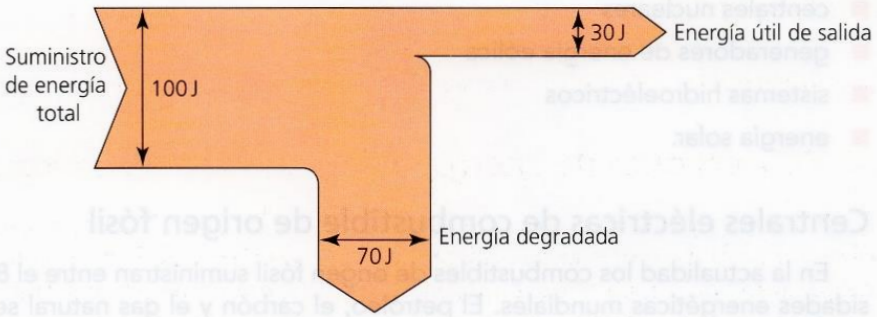


Figura 8.8
Un diagrama simple de Sankey

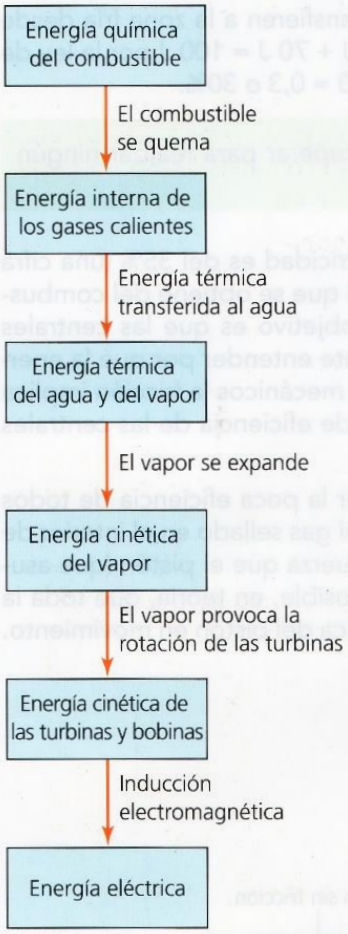


Figura 8.9
Transferencia de energía en una central eléctrica de combustible fósil

descrito anteriormente en la Figura 8.6. La anchura de cada una de las secciones es proporcional a la cantidad de energía (o potencia), empezando por el suministro de energía que se muestra en la parte izquierda del diagrama. La energía degradada se representa mediante flechas hacia abajo y los flujos de energía útil hacia la derecha.

A estos diagramas se les conoce como **diagramas de Sankey** y se pueden utilizar para representar muchas transformaciones de energía.

En la Figura 8.9 se representan las transformaciones de energía útil de una central eléctrica de combustible fósil (como la de la Figura 8.5), mientras que en la Figura 8.10 se muestra un diagrama de Sankey que describe el flujo de energía a través del mismo sistema, incluida la energía degradada.

Las simulaciones por ordenador son de gran ayuda a la hora de observar y comparar los diagramas de Sankey para distintos procesos físicos.

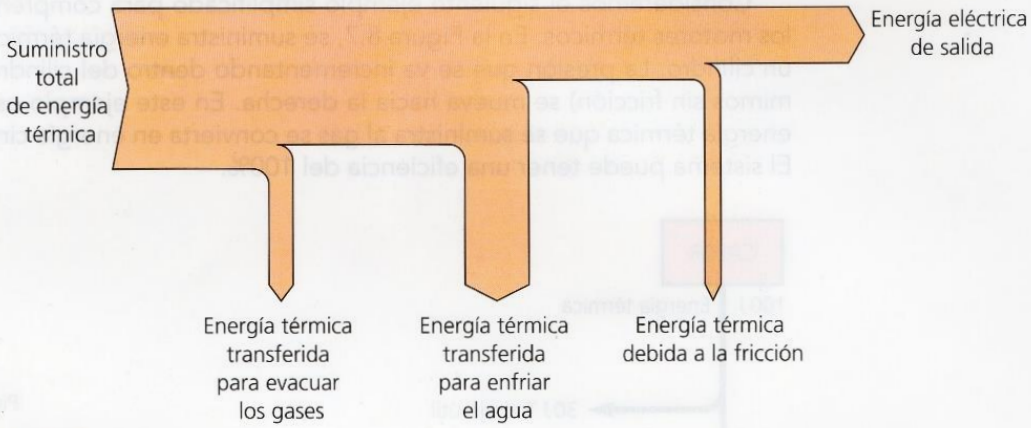


Figura 8.10
Diagrama de Sankey de una central eléctrica que opera con combustible de origen fósil

9 Estima la eficiencia total de la central eléctrica que se representa en la Figura 8.10.

10 Dibuja los diagramas de Sankey que representen los flujos de energía de:
- **a** un coche que viaja a velocidad constante
- **b** la bombilla de una linterna pequeña que funciona con una pila.

11 **a** ¿Qué tiene más energía interna: 1 kg de agua a 25 °C o 1 kg de agua a 35 °C?
- **b** Explica por qué es teóricamente posible transferir energía a partir del agua a 25 °C para realizar trabajo útil si se encuentra en una habitación a 15 °C, pero no se puede transferir la energía útil de esa misma agua si está en una habitación a 35 °C.
- **c** Todo lo que nos rodea contiene enormes cantidades de energía interna. Explica por qué no podemos extraer esta energía para realizar trabajo útil.

Opciones energéticas

En el resto de esta sección describiremos las características básicas, así como algunas ventajas e inconvenientes de usar las fuentes de energía siguientes:

- centrales eléctricas de combustible fósil
- centrales nucleares
- generadores de energía eólica
- sistemas hidroeléctricos
- energía solar.

Centrales eléctricas de combustible de origen fósil

En la actualidad los combustibles de origen fósil suministran entre el 80% y el 85% de las necesidades energéticas mundiales. El petróleo, el carbón y el gas natural se usan en todo el mundo

para generar electricidad y para el transporte. No obstante, la combustión de combustibles de origen fósil tiene dos inconvenientes a destacar:

- Los gases que se liberan durante la combustión de combustibles de origen fósil entran en la atmósfera de la Tierra, y casi con toda seguridad contribuyen al incremento de la temperatura global y al *cambio climático*. Este tema de vital importancia se trata con más detalle en la Sección 8.2.
- Los combustibles de origen fósil no son fuentes renovables y no podemos continuar usándolos al ritmo actual. Nuestros suministros terminarán por agotarse.

En la Figura 8.11 se muestra el exterior de una central eléctrica convencional de combustible de origen fósil. En la Figura 8.9 se usa un diagrama de Sankey para representar el flujo de energía de una central eléctrica de combustible de origen fósil.

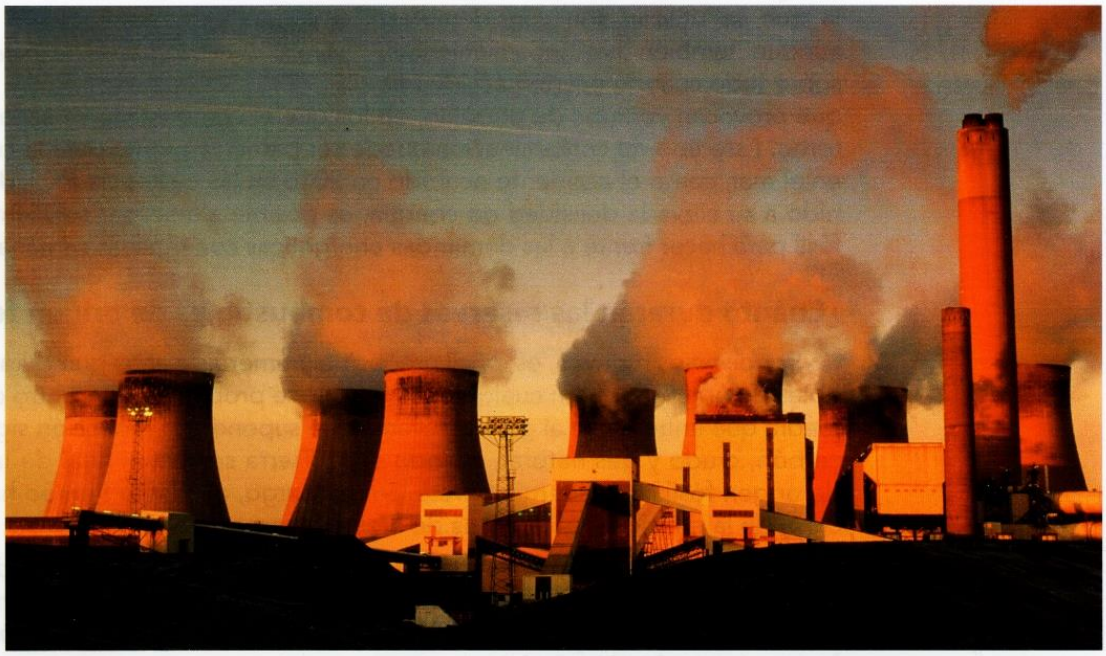


Figura 8.11
Central eléctrica que opera con combustible de origen fósil

Todos los combustibles de origen fósil tienen energías específicas altas en comparación con la mayoría del resto de fuentes de energía, excepto la energía nuclear (tal como se detalla en la Tabla 8.1). Este es uno de los principales motivos por los que el mundo se ha vuelto tan dependiente de ellos. En el Ejemplo resuelto 1 se realiza un cálculo típico del consumo de combustible de una central eléctrica alimentada con gas.

Ejemplo resuelto

1 Calcula la potencia de salida útil de una central eléctrica alimentada con gas que usa gas natural a una tasa de 15,0 kg s^{-1}. Asume que la energía específica del gas es de 55 M J kg^{-1} y la eficiencia de la central eléctrica es del 45%.

Potencia de salida, P = eficiencia × masa del combustible que se quema cada segundo × energía específica

$P = 0{,}45 \times 15{,}0 \times (55 \times 10^6)$

$P = 3{,}7 \times 10^8$ W (370 MW o 0,37 GW)

Las centrales eléctricas alimentadas con gas natural son las centrales eléctricas más eficientes. Pueden convertir casi la mitad de la energía potencial química del gas en energía eléctrica (tienen aproximadamente el 45% de eficiencia). Las centrales eléctricas alimentadas con carbón no tienen por lo general más del 35% de eficiencia, mientras que las alimentadas con petróleo tienen una eficiencia aproximada del 40%. (Estas cifras son solo orientativas: se han redondeado al cinco por ciento más próximo para que puedan recordarse con facilidad). Opción B: Física para la ingeniería usa las leyes de la termodinámica para explicar por qué es imposible lograr eficiencias mucho más elevadas que estos valores.

Dada su alta energía específica, el coste del transporte de carbón por tren a largas distancias no es tan elevado en comparación con otros gastos en los que se incurre a la hora de generar energía. Por razones similares, el petróleo y el gas natural (al ser fluidos) normalmente se transportan en todo el mundo a través de conducciones muy largas. El petróleo también se transporta en grandes cantidades en barcos (petroleros). Las ventajas de trasladar los combustibles de origen fósil desde el lugar de extracción hasta la zona en la que se utilizan son considerables, aunque también hay inconvenientes, sobre todo cuando ocurren accidentes que provocan vertidos de petróleo, en los que el combustible se esparce extensamente en el entorno. Este tipo de contaminación puede ser particularmente dañina cuando el vertido tiene lugar en el mar, como el accidente ocurrido en 2010 en las costas de EE. UU. (véase la Figura 8.12). Debido a su elevada densidad de energía, es posible almacenar suficientes combustibles de origen fósil para hacer frente a las demandas energéticas con muchas semanas de antelación.



Figura 8.12
Vertido de petróleo en el Golfo de México, 2010

¿Cuánto durarán las reservas de combustibles de origen fósil?

Por diversos motivos, es difícil predecir el número de años que durarán las reservas de combustibles de origen fósil. En cualquier caso, parece probable que dentro de unos 100 años el mundo tendrá que enfrentarse al gran problema que supondrá la reducción significativa de las reservas de carbón, crudo y gas natural, cuando en la Tierra se viva el final de la «era de los combustibles de origen fósil» y la energía barata. Sin embargo, al mismo tiempo habrá una reducción beneficiosa de la emisión de los gases de efecto invernadero.

Al *ritmo de uso actual*, las reservas existentes de carbón pueden durar otros 150 años, las de gas natural unos 60 años y las de crudo aproximadamente 50 años, aunque estas cifras pueden ser muy engañosas porque el mundo continúa cambiando y no podemos estar seguros de muchos factores, entre los que están:

- la cantidad de combustible de origen fósil que queda por descubrir
- si los recursos existentes que actualmente no se consideran económicamente rentables para extraerlos del suelo serán más viables en el futuro cuando mejoren las tecnologías y cambien las condiciones económicas (por ejemplo, el *fracking*)
- hasta qué punto se incrementará el uso de las fuentes renovables y la energía nuclear
- cuánto aumentará el consumo energético mundial.

A todo esto hay que añadir las presiones económicas y políticas que tendrán efectos imprevisibles y de extremada relevancia. Es obvio que algunos países son «ricos» en reservas de combustibles de origen fósil (por ejemplo, los EE. UU. poseen las mayores reservas de carbón, véase la Figura 8.13), mientras que otros países tienen muy pocas o ninguna.

En la Tabla 8.2 se resumen las ventajas y los inconvenientes más destacados del uso de combustibles de origen fósil.



Figura 8.13
EE. UU. posee las mayores reservas de carbón

Ventajas	Inconvenientes
• Elevada densidad energética. • El combustible es relativamente barato (aunque los factores económicos y políticos pueden desencadenar cambios significativos y repentinos en el precio). • La construcción y el mantenimiento de las centrales eléctricas son relativamente económicos (si se considera su elevada potencia de salida). • Las centrales eléctricas se pueden construir casi en cualquier lugar (que tenga unas buenas conexiones de transporte y suficiente suministro de agua). • Se trata de tecnologías ya establecidas: tanto las centrales eléctricas como los sistemas de transporte y de almacenamiento ya existen.	• Emisiones de gases de efecto invernadero y el calentamiento global. • Contaminación química durante las labores de minería y combustión (incluida la lluvia ácida). • Son fuentes no renovables. • La extracción o las labores de minería pueden dañar el medio ambiente y suponer un peligro para la salud. • Las fugas de los petroleros de crudo o de los oleoductos pueden provocar daños considerables en el medio ambiente.

Tabla 8.2 *Ventajas e inconvenientes del uso de combustibles de origen fósil*

12 Un tren de vapor anticuado tiene una potencia de salida de 2,3 MW y una eficiencia de solo el 8,4%. Si el carbón que se utiliza tiene una energía específica de 29 M J kg^{-1}, ¿cuánto carbón tiene que quemar por minuto?

13 a ¿Cuánto combustible (queroseno) consume un avión de pasajeros si viaja a una velocidad constante de 240 m s^{-1} con una potencia de salida de 89 MW? Considera que el combustible tiene una densidad de energía de 37 MJ m^{-3} y los motores, una eficiencia del 39%.

b ¿Cuál es la fuerza de resistencia que actúa sobre el avión?

c Determina la cantidad de combustible que necesita para viajar una distancia de 5000 km a altura y velocidad constantes.

14 Una central eléctrica alimentada con petróleo tiene una eficiencia del 40% y utiliza combustible a una tasa de 13 kg s^{-1}. ¿Cuál es la energía específica del combustible?

15 a ¿Cuál es la eficiencia de una central eléctrica alimentada con carbón que tiene una potencia media de salida de 560 MW cuando se quema combustible a una tasa de $4{,}8 \times 10^6$ kg todos los días? (Considera que la energía específica del carbón es 30 M J kg^{-1}.)

b Si se eliminara la energía térmica disipada de la central eléctrica enfriando agua, que no debe incrementar su temperatura más de 4,0 °C, calcula la velocidad mínima del flujo de enfriamiento de agua que se necesita. La capacidad calorífica específica del agua es 4180 J kg^{-1} $°C^{-1}$.

c Calcula la masa de carbón que se debe quemar al año para abastecer las necesidades de un hogar que utiliza una potencia media de 3 kW.

16 Busca en Internet información actualizada sobre cuánto tiempo se estima que duren las reservas de combustibles de origen fósil.

Centrales nucleares

Hay un total aproximado de 500 centrales nucleares en 30 países diferentes de todo el mundo. EE. UU. posee el mayor número de reactores, aunque es en Francia donde se genera el mayor porcentaje de energía eléctrica a partir de **reactores nucleares**. China y Rusia planifican la construcción de un amplio número de reactores. El uso de la energía nuclear es un tema controvertido que provoca opiniones confrontadas en muchas personas, aunque no es razonable hacerse una opinión sin entender primero los procesos físicos que intervienen.



Figura 8.14
La central nuclear de Cruas, Francia, con una potencia de 3,6 GW, cubre aproximadamente el 5% de las necesidades de electricidad del país

Reacciones en cadena y transferencias de energía

La energía que se libera en un reactor nuclear procede de la *fisión* de núcleos, no de la desintegración radiactiva. Cuando se inicia (se desencadena) una reacción de fisión en un núcleo de uranio-235 mediante la *captura* de un neutrón, el proceso libera unos 200 MeV ($3{,}2 \times 10^{-11}$ J) de energía (para obtener más detalles, véase el Capítulo 7). La energía potencial nuclear se transfiere en forma de energía cinética de los núcleos resultantes (los **fragmentos de fisión**) y de los neutrones y fotones. Se trata de una enorme cantidad de energía procedente de una insignificante reacción nuclear.

Si se puede repetir el mismo proceso con una gran cantidad de núcleos de uranio, el aumento de la energía cinética resultante de tantas partículas conllevará de manera eficaz un gran incremento en la energía interna del material. El uranio se calentará mucho más en el caso de la producción de energía eléctrica a gran escala, casi del mismo modo que en una central eléctrica

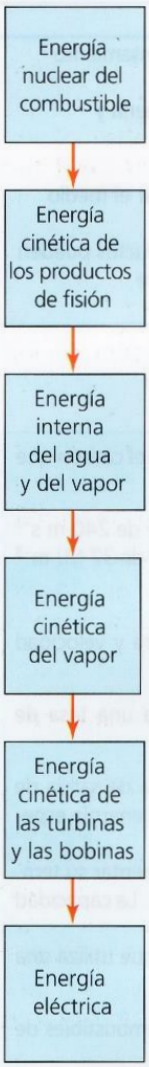


Figura 8.15
Flujo de energía en una central nuclear

convencional alimentada con combustible de origen fósil. El material que se usa se llama **combustible nuclear** y normalmente tiene forma de *barras*. Obviamente, el combustible nuclear es diferente del combustible de origen fósil porque no se quema para transferir energía. En la Figura 8.15 se relacionan las principales transformaciones energéticas que tienen lugar en una central nuclear.

La siguiente ecuación es solo una de las diversas reacciones de fisión posibles que pueden experimentar los núcleos de uranio-235 cuando interactúan con los neutrones térmicos. Se representa también en el diagrama de la Figura 8.16.

$$^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{144}_{56}Ba + {}^{89}_{36}Kr + 3\,^{1}_{0}n + \text{aproximadamente 200 MeV de energía}$$

Cuando un neutrón colisiona con un núcleo de uranio-235, no es seguro que se produzca la fisión; de hecho, es poco probable y normalmente solo un pequeño porcentaje de interacciones iniciarán la fisión nuclear. De la ecuación anterior se deduce que, en este ejemplo, cada fisión nuclear produce tres neutrones más (la media de todas las fisiones de uranio-235 es 2,5) y estos tres neutrones originan a su vez otras fisiones. Si, de media, al menos uno de los neutrones origina más fisiones, entonces el proceso continúa y se conoce como **reacción en cadena**, un tipo de reacción que es difícil conseguir.

Si, de media, cada reacción de fisión conlleva otra reacción de fisión (y así sucesivamente), el número de fisiones por segundo se mantiene *constante* y el proceso se dice que está *controlado* o es una **fisión nuclear automantenida**. El funcionamiento de los reactores nucleares que generan electricidad en las centrales eléctricas se basa en este proceso. Sin embargo, si cada fisión produce más de una fisión adicional, se dice que la reacción está *descontrolada* y el número de fisiones por segundo aumenta rápidamente. Esto provoca la liberación de una gran cantidad de energía en muy poco tiempo, que es lo que sucede en las armas nucleares.

En la Figura 8.17 se representa un ejemplo idealizado del inicio de una reacción en cadena en la que todos los neutrones originan más fisiones.

En cualquier muestra de uranio-235 se produce un número relativamente reducido de reacciones de fisión al azar de forma constante. Estas reacciones proporcionan los neutrones necesarios para desencadenar otras reacciones de fisión. Para poder favorecer y controlar la fisión nuclear, los científicos necesitan comprender los principales factores que influyen en la probabilidad de que la fisión tenga lugar, que son los siguientes:

1. Los neutrones son partículas penetrantes (porque no tienen carga) y muchos, o la mayoría, normalmente atravesarán el material sin interactuar con otros núcleos.
2. Los átomos de uranio-235 suponen únicamente un pequeño porcentaje de todos los átomos que forman el material.
3. Cuando un neutrón interactúa con un núcleo de uranio-235, solo provocará la fisión si se mueve relativamente despacio (neutrones térmicos). Los neutrones rápidos no provocan fisión.

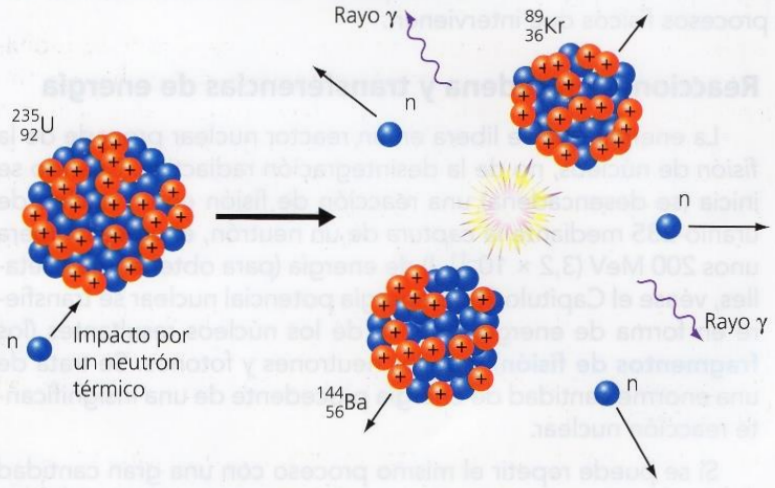


Figura 8.16
Fisión del uranio-235

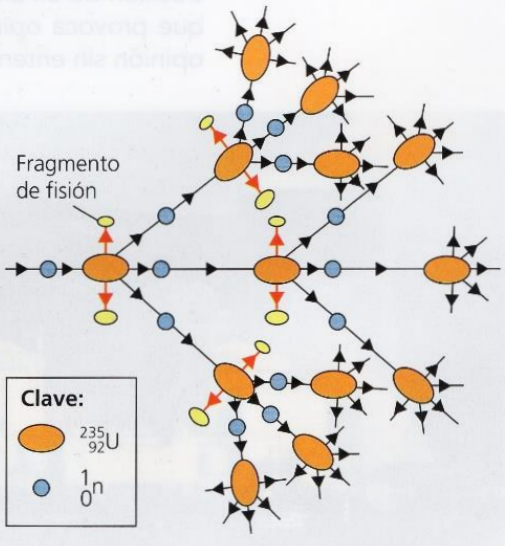


Figura 8.17
Inicio de una reacción en cadena

Masa crítica

El volumen de un cuerpo sólido aumenta en proporción al área de su superficie (consideremos cubos de diferentes tamaños). Esto significa que cuanto más masa tenga un material, menor será el porcentaje de neutrones que alcanzará la superficie y escapará. Es decir, hay un mayor porcentaje que puede provocar la fisión. La **masa crítica** de un material es la masa mínima que se necesita para una reacción en cadena automantenida. (El uranio que contiene un 20% de uranio-235 tiene una masa crítica superior a 400 kg).

Enriquecimiento del combustible: incremento del porcentaje de uranio-235

El uranio-235 es el único núclido del planeta que se da en cantidades significativas para mantener una reacción en cadena. Sin embargo, cuando el mineral de uranio se extrae del suelo y se refina, la proporción de átomos de uranio-238 es del 99,3% y de uranio-235 solo del 0,7% (con trazas de otros isótopos de uranio). Todos los isótopos de uranio son radiactivos, pero la semivida (o periodo de semidesintegración) del uranio-238 es muy larga ($4{,}5 \times 10^9$ años), similar a la edad de la Tierra, mientras que la semivida del uranio-235 es de $7{,}0 \times 10^8$ años.



Figura 8.18
Barras de combustible de uranio

Para generar una reacción en cadena y electricidad, el porcentaje de uranio-235 tiene que aumentar aproximadamente un 3% como mínimo, aunque son preferibles porcentajes más elevados. (Para fabricar armas nucleares se necesita un porcentaje muy superior). A este proceso se le conoce como **enriquecimiento del combustible**. En la Figura 8.18 se muestra una fotografía de barras de combustible de uranio enriquecidas.

Los núcleos de uranio-238 pueden absorber neutrones sin provocar fisión, por lo que una cantidad excesiva de uranio-238 puede impedir una reacción en cadena. El enriquecimiento no se puede realizar químicamente porque los isótopos del mismo elemento tienen las mismas propiedades químicas, por lo que se deben emplear procesos físicos (por ejemplo, la *difusión* de compuestos de uranio gaseosos), pero son tecnologías complejas y costosas. Al uranio que queda se le denomina *uranio empobrecido* y tiene propiedades físicas, en concreto una elevada densidad, muy útiles en ingeniería militar, aunque esto ha originado cierta controversia (porque es radiactivo).

Moderador, barras de control e intercambiador de calor

Los neutrones liberados en la fisión nuclear tienen unas energías convencionales de 1 MeV aproximadamente, lo que significa que se mueven muy deprisa, normalmente demasiado deprisa para iniciar otra reacción de fisión. Cuanto más despacio se desplaza un neutrón, mayor probabilidad tiene de ser capturado por un núcleo de uranio. Por lo tanto, antes de que se produzca una reacción en cadena debemos reducir la velocidad de los neutrones a energías inferiores a 1 eV (por eso se les denomina con frecuencia neutrones *térmicos*). Al proceso se le conoce como *moderación* de los neutrones y el material que se utiliza es un **moderador**.

Para que los neutrones rápidos pierdan la mayor parte de su energía cinética, deben colisionar muchas veces con los núcleos de los átomos. En general, cuando las partículas chocan hay un mayor porcentaje de transferencia de energía cinética entre ellas si tienen aproximadamente la misma masa (véase el Capítulo 2). La masa de un neutrón siempre es inferior a la masa de todo un núcleo, pero la diferencia es menor para los núcleos con poca masa. Ese es el motivo de que para este proceso de moderación se prefieran los núcleos de masa reducida, aunque también es determinante que los núcleos no absorban neutrones. Por lo general, como moderador se usa el grafito (carbono) o el agua.

En el reactor refrigerado con agua a presión que aparece en la Figura 8.19, la fisión nuclear tiene lugar en las **barras de combustible** de la **cuba de seguridad del reactor**. Cuando el agua pasa por las barras de combustible calientes, absorbe energía térmica y, al mismo tiempo, actúa de moderador reduciendo la velocidad de los neutrones.

El agua caliente que atraviesa la cuba de seguridad del reactor lo hace en un sistema sellado y nunca sale del contenedor de hormigón. Su temperatura puede alcanzar los 300 °C, pero no llega a hervir porque se encuentra a una presión muy elevada. Se bombea a una **intercambiador de calor** en el que la energía térmica del agua se transfiere a más cantidad de agua en un sistema *independiente* (una medida de seguridad importante). De este modo se genera vapor, que hace girar las turbinas para generar electricidad.

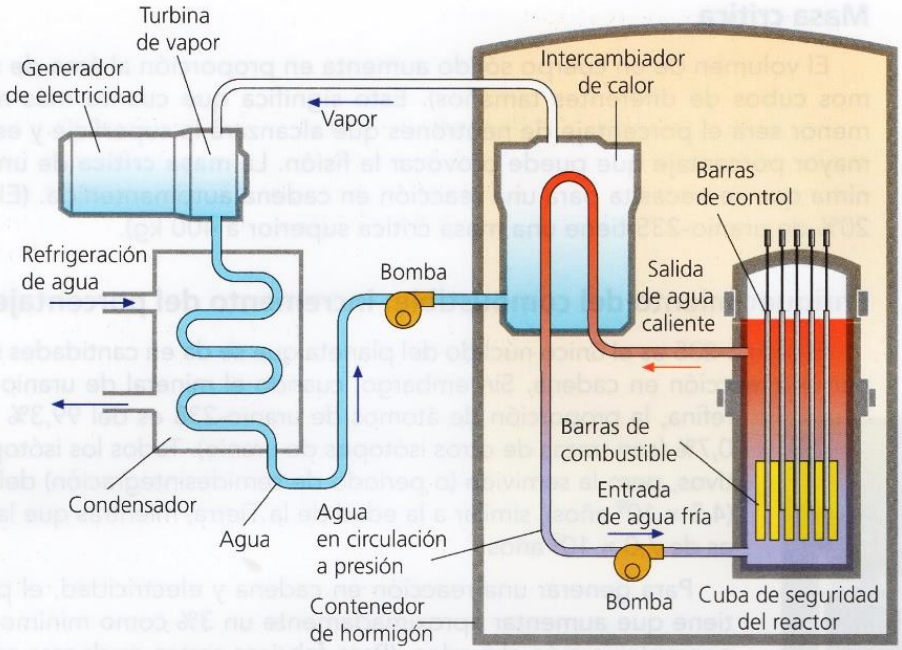


Figura 8.19
Reactor refrigerado con agua a presión

Las **barras de control** (normalmente fabricadas con boro) se usan para ajustar la velocidad de las reacciones de fisión mediante la absorción de neutrones. Esto se consigue sacando e introduciendo las barras del sistema las veces que sean necesarias. En la Figura 8.20 se representa el uso de las barras de control para producir fisión controlada.

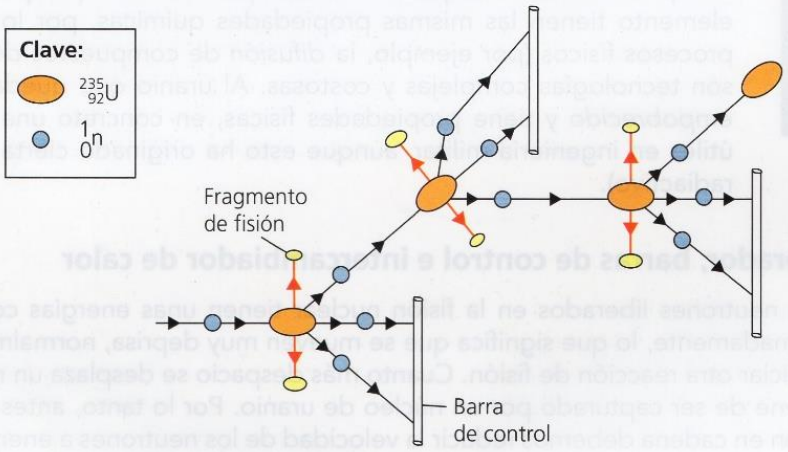


Figura 8.20
Uso de las barras de control para controlar una reacción en cadena

Se aconseja a los estudiantes que usen las simulaciones por ordenador para generar modelos de los trabajos que se realizan en las centrales nucleares y otros procesos nucleares.

17 Calcula la velocidad de: **a** un neutrón de 1 MeV, **b** un neutrón de 1 eV.

18 Explica por qué los isótopos de uranio son tan difíciles de separar mediante métodos físicos.

19 Una central nuclear que usa uranio-235 tiene una eficiencia del 43% y una potencia de salida útil de 1 GW.
a Si la energía media que se libera por fisión es de 190 MeV, calcula cuántas fisiones tienen lugar por segundo.
b ¿Qué masa de uranio-235 necesita a diario?

20 **a** Calcula la energía específica del uranio-235 puro (en $J\,kg^{-1}$).
b Si el uranio-235 solo representa el 3% de la masa total del combustible, calcula la densidad de energía del combustible.
c Compara tu respuesta en **b** con un tipo de carbón que puede transferir 29 M $J\,kg^{-1}$.

21 Otra posible fisión de uranio-235 genera $^{138}_{55}Cs$ y $^{96}_{37}Rb$. Escribe la ecuación nuclear de esta reacción.

22 **a** Si una persona utiliza energía eléctrica a una velocidad media de 1 kW, ¿cuál es su consumo de energía anual?
b ¿Qué masa de átomos de uranio-235 tiene que experimentar una fisión para abastecer las necesidades de energía de un año? (Asume una eficiencia del 100%).

Problemas de seguridad

Accidentes nucleares

Es justo afirmar que los riesgos de la energía nuclear se conocen perfectamente y, como resultado, las normas de seguridad son muy estrictas. Sin embargo, para mucha gente, esto no es lo suficientemente tranquilizador, porque, con independencia de las medidas que tomen los ingenieros nucleares, puede haber accidentes y desastres naturales. Las normas de seguridad varían de unos países a otros, pero las consecuencias de un accidente nuclear en cualquier sitio pueden ser realmente desastrosas.

Los accidentes nucleares con más repercusión a nivel mundial de Chernobyl, Ucrania, en 1986, y de Fukushima (véase la Figura 8.21), Japón, en marzo de 2011, siguen siendo clarísimas advertencias de los posibles riesgos asociados a la energía nuclear. Las fugas de radiación y las explosiones en Fukushima fueron consecuencia de los efectos del tsunami, mientras que la «fusión» de uno de los reactores de Chernobyl fue el resultado del diseño y la administración deficientes de aquella época. Los diseños y los procedimientos de seguridad actuales se han mejorado mucho, pero todavía pueden ser insuficientes a la hora de hacer frente a un desastre natural. Cientos de miles de personas tuvieron que ser evacuadas a causa de estos sucesos, y se necesitarán muchos años para confirmar el número de enfermedades a largo plazo y de muertes que provocaron.

Una **fusión del reactor** es, con toda probabilidad, la posible consecuencia más grave de un accidente nuclear. Si, por alguna razón (por ejemplo, la pérdida de refrigerante o un fallo en el correcto funcionamiento de las barras de control) el núcleo del reactor se calienta demasiado, o incluso se funde, la cuba de seguridad del reactor puede resultar gravemente dañada. Cuando los materiales a temperaturas extremadamente altas se exponen de forma repentina al aire, pueden provocar fuegos y explosiones. Los materiales radiactivos altamente concentrados y peligrosos pueden llegar al suelo, al agua o al aire, de modo que se esparcen a largas distancias según las condiciones geográficas y climatológicas.



Figura 8.21
El reactor nuclear de Fukushima después de las explosiones por los efectos del tsunami (2011)

Cuando se consideran los peligros de la energía nuclear, se debe recordar siempre que el uso de *todos* los demás tipos de fuentes de energía conlleva también riesgos. En concreto, la explotación de las minas de carbón ha sido responsable de un número extremadamente alto de lesiones graves, problemas de salud a largo plazo y muertes durante los últimos 200 años.

Residuos nucleares

Los productos de las reacciones de fisión tienen unas dosis muy elevadas de radioactividad y pueden, por lo tanto, resultar peligrosos si las normas de seguridad no son lo suficientemente estrictas. Todo lo que tenga relación con el reactor debe ser considerado como un riesgo potencial para la salud, aunque el verdadero riesgo se encuentra obviamente en las propias barras de combustible. Los residuos nucleares, como las propias barras de combustible cuando ya no son útiles, son muy radiactivos y contienen algunos isótopos con semividas muy largas, lo que significa que seguirán suponiendo un peligro durante muchos miles de años. A modo de ejemplo, el ^{99}Tc tiene una semivida (o periodo de semidesintegración) de 210 000 años. No obstante, debemos tener en cuenta que si un radioisótopo tiene una semivida muy larga, la actividad generada por cada gramo será muy reducida.



Figura 8.22
Almacenamiento de residuos nucleares



Figura 8.23
Mina de uranio en MacClean Lake, Saskatchewan (Canadá)

No es posible detener la emisión de radiación nuclear de un material radiactivo, por lo que las medidas de seguridad se deben concentrar en la prevención de la exposición a la radiación que puedan tener las personas. Las sustancias radiactivas deben estar rodeadas de materiales que absorban la radiación de forma segura. Según las circunstancias, los muros gruesos de hormigón, el agua y el plomo son los materiales que se suelen usar con esta finalidad. La exposición a la radiación también se reduce manteniendo a las personas lo más alejadas posible o, en caso de que necesiten acercarse, llevando ropa de protección y limitando el tiempo de exposición.

La eliminación de los residuos nucleares altamente peligrosos sigue siendo un problema grave que estamos dejando a las generaciones futuras. Actualmente, parte de estos residuos se almacenan bajo tierra dentro de contenedores muy sólidos y de gran grosor, diseñados para evitar fugas, mientras que otros están almacenados en superficie, en lugares donde se pueden supervisar con mayor facilidad (véase la Figura 8.22).

Minería

El uranio es una traza común en muchos minerales de todo el mundo, pero más de la mitad de las minas de uranio del planeta se localizan en solo tres países: Canadá (véase la Figura 8.23), Australia y Kazajistán. Para obtener una pequeña cantidad de uranio, que normalmente se encuentra en forma de óxido de uranio, es necesario extraer gran cantidad de rocas de extensas minas a cielo abierto.

Uno de los productos de la desintegración de núcleos de uranio es el gas radiactivo radón, lo que convierte a las minas de uranio en zonas potencialmente peligrosas. Como se trata de un gas, cualquier partícula de radón presente en el aire puede entrar en los pulmones y, una vez en el interior del organismo, la radiación que emite es mucho más dañina que cualquier otra fuente de radiación en el exterior del cuerpo.

Aplicaciones

Armas nucleares

La primera bomba nuclear se probó en 1945 en EE.UU. El último país que desarrolló armas nucleares fue Corea del Norte en 2013. Se cree que hay nueve países que poseen armas nucleares, aunque todos alegan que es por motivos de defensa nacional y que nunca usarán las armas excepto bajo circunstancias extremas si son atacados por otro país.

El poder destructivo de una única bomba nuclear quedó demostrado tanto en Hiroshima como en Nagasaki, Japón, en 1945. El requisito básico es una masa crítica (aunque no toda en una sola pieza) de plutonio-239 o uranio-235 muy enriquecido (enriquecido como mínimo al 20%, pero preferiblemente mucho más). Cuando la bomba se va a detonar, las dos mitades separadas de la masa crítica se tienen que unir mediante una explosión convencional relativamente pequeña, como la que se muestra en la Figura 8.24, que es lo que provoca una reacción en cadena descontrolada.

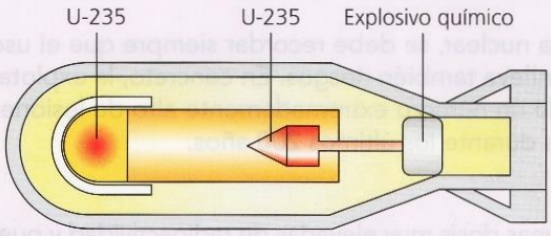


Figura 8.24
Masas subcríticas de una bomba nuclear como la usada en Hiroshima: una explosión convencional une las dos masas subcríticas

La producción de uranio enriquecido «apropiado para armas nucleares» es técnicamente compleja y extremadamente costosa. La alternativa, el plutonio-239, es un producto que captura neutrones mediante los núcleos de uranio-238 en una central nuclear, y que posteriormente se puede recuperar de las barras de combustible. De ahí la preocupación actual de que unos pocos países puedan usar sus programas de energía nuclear para desarrollar (en secreto) armas nucleares.

Mucha gente argumenta que el peligro que supone que países, organizaciones o personas «inapropiadas» dispongan de armas nucleares es una de las mayores amenazas a las que se enfrenta el mundo en el siglo XXI. Sin embargo, hay personas que creen que la amenaza del uso de estas armas realmente ha ayudado a prevenir guerras de gran magnitud, mientras que otras defienden que no puede haber justificación para la creación o el uso de armas nucleares bajo *ninguna* circunstancia. Lamentablemente, en el mundo actual debemos ser conscientes de las posibilidades de ataques terroristas en las centrales nucleares o en el transporte de materiales nucleares, o bien del uso de bombas nucleares o «sucias» por parte de terroristas.

1 Es fácil estar de acuerdo en que un mundo sin armas nucleares sería un mundo mejor pero, una vez inventadas, ¿será posible eliminarlas en su totalidad?

2 Busca información sobre el *Tratado de no proliferación nuclear* y averigua qué países no lo han firmado.

En la Tabla 8.3 se resumen las ventajas y los inconvenientes del uso de la capacidad nuclear.

Ventajas	Inconvenientes
• La densidad de energía es extremadamente alta. • No se emiten gases de efecto invernadero durante las operaciones rutinarias. (Algunos científicos creen que la energía nuclear puede ser la única solución realista al calentamiento global). • No hay contaminación química durante la actividad. • Todavía hay disponibles cantidades razonablemente altas de combustibles nucleares. • A pesar de algunos incidentes graves, desde el punto de vista estadístico durante los últimos 50 años se ha demostrado que la energía nuclear es una tecnología energética razonablemente segura.	• Los residuos radiactivos son peligrosos y perdurables. • Es cara. • Teniendo en cuenta todo el proceso, no es tan eficiente. • La amenaza de accidentes graves. • Es un posible objetivo para los terroristas. • Está relacionada con las armas nucleares. • No es una fuente renovable.

Tabla 8.3
Ventajas e inconvenientes de la energía nuclear



Figura 8.25
Los manifestantes intentan detener el envío y almacenamiento de residuos nucleares

Enlace con la teoría del conocimiento

¿Hasta qué punto debe influir la opinión pública en la investigación y el desarrollo científicos?

El uso de la energía nuclear inspira gran variedad de respuestas emocionales por parte de los científicos y la sociedad. ¿Cómo se puede realizar una valoración precisa del riesgo científico en áreas con importante carga emocional?

Hay pocas áreas de la ciencia en las que el conocimiento y las emociones estén tan entrelazados como en cualquier debate sobre la energía nuclear. Casi todo el mundo tiene una opinión fundamentada, ya sea a favor o en contra del uso de la energía nuclear. Las trágicas consecuencias de un accidente nuclear en un lugar concreto son, sin duda alguna, aterradoras, pero es necesario realizar una **valoración de riesgos** para compararlas cuidadosamente con los riesgos a largo plazo y más extendidos asociados al uso de otros recursos energéticos, o incluso con otros riesgos de la vida cotidiana.

Si intentamos formarnos una opinión honesta sobre cualquier tema, nuestras propias experiencias previas, nuestros prejuicios y emociones influirán en lo que pensemos, por mucho que queramos ser **objetivos**. No cabe duda de que los procesos compartidos de la ciencia tratan de eliminar a toda costa esta tendencia, pero «el conocimiento» que tenemos cada uno de nosotros está enormemente personalizado.

Fusión nuclear

La **fusión nuclear** es la fuente de energía que hay en todas las estrellas, incluido el Sol (véase el Capítulo 7). En una reacción de fusión característica como la que se muestra en la ecuación siguiente se transfieren aproximadamente 18 MeV:

$$^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n$$

Los dos núcleos de hidrógeno (conocidos como deuterio y tritio) tienen carga positiva, y únicamente se fusionan si cuentan con suficiente energía cinética como para superar las fuerzas repulsivas. Para lograr esta elevada energía cinética se requieren temperaturas superiores a 10^8 K. A estas temperaturas tan elevadas, los electrones se mueven de forma independiente alrededor de los iones de hidrógeno (protones) y al gas se le denomina **plasma**.

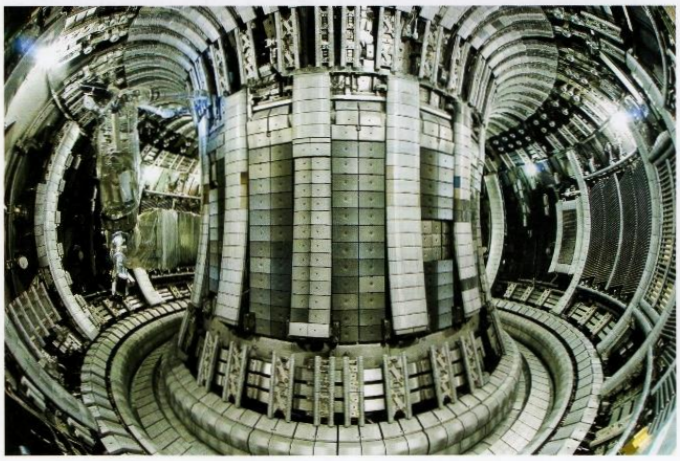


Figura 8.26
Reactor termonuclear ruso Tokamak

La fusión nuclear a estas temperaturas se ha conseguido en la Tierra, pero el problema es poder continuar (*sostener*) las reacciones durante un periodo significativo. El plasma caliente no puede entrar en contacto con las paredes del contenedor porque este se contaminaría y el plasma se enfriaría.

Para evitar este problema el plasma se confina (se contiene) mediante un campo magnético muy intenso, como el del reactor ruso termonuclear de diseño Tokamak, que usa un campo en forma de rosca (toro) (Figura 8.26).

Si la energía se pudiera liberar a gran escala mediante fusión nuclear, tendría la ventaja de ser un suministro de combustible más abundante con menos problemas de residuos radiactivos que el proceso de fisión nuclear. Estas ventajas son significativas, pero a pesar de todos los años de considerables esfuerzos científicos, todavía no se ha desarrollado la tecnología necesaria para mantener las reacciones de fusión nuclear.

23 Todos los isótopos del uranio son radiactivos y se desintegran en otros elementos. Explica por qué todavía hay una cantidad significativa de uranio en la Tierra.

24 Si, después de un accidente nuclear en el que interviene un isótopo con una semivida de 12 años, el nivel de radiación en el ambiente es 33 veces superior que el de recuento de fondo normal, ¿cuánto tiempo aproximadamente debería transcurrir antes de que la gente pudiera volver a entrar en la zona?

25 **a** Los residuos nucleares peligrosos se almacenan bajo tierra durante más de 100 000 años. Sugiere alguna explicación por la que este plan puede fallar.
b ¿Podría ser una alternativa sensata colocar estos residuos en un cohete y enviarlos al Sol? Argumenta tu respuesta.

26 **a** Usa la ley de Coulomb para calcular la fuerza de repulsión entre un núcleo de tritio y un núcleo de deuterio si la distancia que los separa es de $5{,}0 \times 10^{-15}$ m.
b Calcula la aceleración con la que el núcleo de deuterio comenzará a moverse.

27 **a** Recopila datos en Internet sobre el número total de muertes y enfermedades graves que se han atribuido al accidente de Chernobyl desde que ocurrió en 1986.
b Probablemente encontrarás que la información difiere según los distintos sitios web consultados. ¿Por qué crees que es difícil encontrar información consistente?
c ¿Cómo puedes decidir qué sitios web ofrecen la información más fiable?

28 Busca información en Internet acerca de los últimos desarrollos en fusión nuclear: ¿qué potencia se ha logrado y durante cuánto tiempo? ¿Qué núclidos se han usado? ¿Dónde se han llevado a cabo? En concreto, ¿qué es y dónde está el ITER?

29 **a** ¿Cuál es tu opinión personal sobre el uso de la energía nuclear? Resume en un máximo de 100 palabras por qué crees que tu país debe, o no debe, utilizar centrales nucleares.
b Lleva a cabo una encuesta entre tus compañeros. ¿Son distintas las opiniones de los estudiantes de física de las de aquellos que no estudian física?

30 **a** ¿En qué circunstancias, si es el caso, crees que un país podría usar un arma nuclear para bombardear a otro?
b ¿Crees que cualquier país tiene derecho a decidir individualmente si puede fabricar o no armas nucleares? En caso negativo, ¿quién debe controlar cualquier desarrollo en las armas nucleares en el mundo?

Generadores de energía eólica

La radiación del Sol genera diferencias de temperatura que pueden provocar cambios en la densidad del aire. Estos cambios producen corrientes de convección y diferencias en la presión atmosférica. Durante miles de años, la energía transferida desde los molinos de viento se ha usado en todo el mundo para realizar trabajos como la molienda de grano (véase la Figura 8.27). Hay una enorme cantidad de energía cinética en los vientos repartidos por todo el planeta, pero la «densidad» energética es baja, y ha sido a partir de los últimos años cuando los avances tecnológicos han fomentado el uso generalizado de generadores eléctricos eólicos. Actualmente se ha convertido en una tecnología en plena expansión.



Figura 8.27
Molinos de viento tradicionales en Grecia

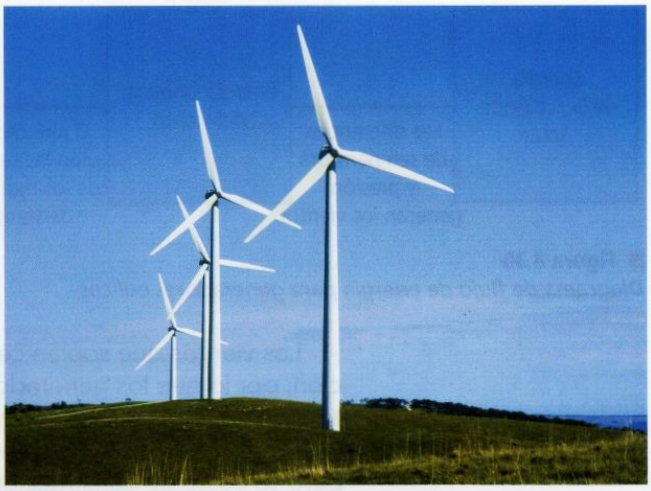


Figura 8.28
Un parque eólico en Dinamarca

Hay muchos diseños diferentes de **generadores eólicos** (¡que generan electricidad, no viento!) pero nos centraremos en el tipo que se usa con mayor frecuencia para generar energía eléctrica a gran escala y que tiene un eje horizontal de rotación, como se muestra en la Figura 8.28. Sin embargo, hay una variedad interesante de diseños de generadores eólicos con ejes verticales, la mayoría de los cuales funciona igual de bien sea cual sea la dirección del viento, como los de la Figura 8.29.



Figura 8.29
Generadores de viento con un eje vertical

Las aspas de un generador de eje horizontal (normalmente tiene tres) se mueven en un círculo vertical y su diseño permite que se muevan con el viento que se desplaza en dirección paralela a la superficie de la Tierra. La energía cinética de las palas se transfiere a la bobina, que gira dentro de los generadores eléctricos. El número de palas, su anchura y su ángulo respecto al viento se eligen cuidadosamente con la finalidad de obtener la máxima cantidad de energía a partir de la energía transferida por el viento. Por el mismo motivo, el mecanismo de la pala suele poder rotar en el plano horizontal, de modo que el viento siempre golpee las palas perpendicularmente. Las palas están diseñadas para rotar a una determinada velocidad con vientos dentro de un rango determinado, normalmente entre 5 y 15 m s^{-1}. En la Figura 8.30 se muestran las transformaciones energéticas que intervienen en la energía eólica.

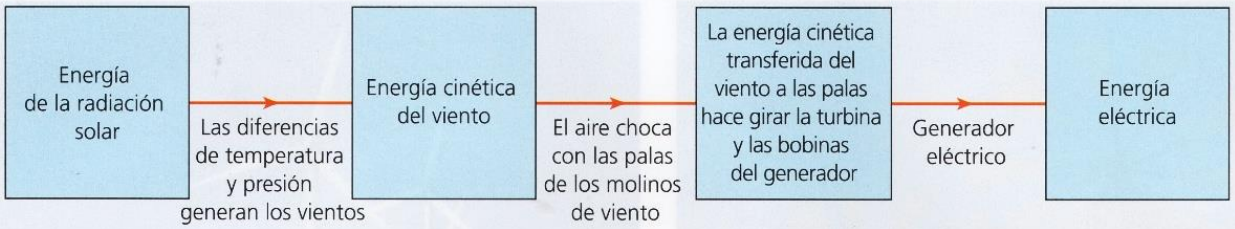


Figura 8.30
Diagrama de flujo de energía para generadores eólicos

Los vientos que soplan cerca del suelo pierden energía al golpear obstáculos y debido a la fricción, por lo que los generadores normalmente se localizan cerca de las costas o en elevaciones del terreno sin árboles, y las torres que sustentan las palas rotatorias tienen la máxima altura posible. La construcción de aerogeneradores en aguas poco profundas en el mar presenta ventajas obvias, pero su coste de construcción es muy elevado. Los parque eólicos más grandes (bien operativos o en construcción) están en las costas del Reino Unido, Dinamarca y Alemania.

Los generadores eólicos más pequeños pueden ser la solución ideal para lugares remotos, como los barcos o las granjas que no tienen acceso a la red eléctrica. En la Tabla 8.4 se describen las ventajas e inconvenientes del uso de la energía eólica.

Ventajas	Inconvenientes
• No hay emisión de gases de efecto invernadero. • Es una fuente renovable. • Es una fuente de energía gratuita. • No genera contaminación. • Los generadores de menor tamaño son ideales para lugares remotos.	• Su construcción es costosa. • Su densidad de energía es baja; se necesitan zonas muy extensas para crear parques (aunque los terrenos adyacentes se pueden cultivar). • La velocidad del viento (y la potencia de salida) no es fiable. • Emite ruido. • Las mejores ubicaciones se encuentran normalmente lejos de poblaciones y ciudades. • Mucha gente cree que no son la opción más estética para el paisaje.

Tabla 8.4
Ventajas e inconvenientes de la energía eólica

Cálculos relativos a la energía eólica

Podemos obtener una ecuación para calcular la potencia de un aerogenerador si consideramos la pérdida de energía cinética del viento que golpea las palas.

La potencia *teórica máxima*, P, que se puede obtener de un aerogenerador con un área de sección transversal A (véase la Figura 8.31), cuando lo golpea el aire de densidad ρ que se mueve a una velocidad v viene dada por:

$$P = \frac{1}{2} A\rho v^3$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

No es sorprendente que la potencia sea proporcional al área y a la densidad, pero debemos remarcar el hecho de que dependa de la velocidad elevada al *cubo*. Si la velocidad del viento se duplica, se puede conseguir teóricamente una potencia ocho (2^3) veces superior.

La transferencia de la energía cinética del aire a la energía cinética de las palas no puede ser 100% eficiente, teniendo en cuenta que parte del viento pasa entre las palas y que el aire que las golpea no cesa, sigue en movimiento.

Perspectivas adicionales

Derivación de una ecuación para la energía eólica

El volumen de aire que pasa por las palas cada segundo, V, es igual a la velocidad del viento, v, multiplicada por el área «barrida» por las palas rotatorias, A.

$$V = vA$$

Como masa = volumen × densidad, ρ, la masa, m, que pasa cada segundo es:

$$m = vA\rho$$

Si utilizamos la ecuación de la energía cinética ($E_C = \frac{1}{2}mv^2$), la energía cinética de esta masa de aire que se desplaza entre las palas cada segundo es:

$$E_{C(aire)} = \frac{1}{2} \times vA\rho \times v^2$$

Sabemos que:

$$\text{potencia} = \frac{\text{energía transferida}}{\text{tiempo}}$$

Por lo tanto, si toda la energía cinética del viento se transfiere al aerogenerador cada segundo (lo que significaría que el aire detrás del generador no se mueve), entonces su potencia teórica máxima, P, viene dada por la siguiente ecuación:

$$P = \frac{1}{2}A\rho v^3$$

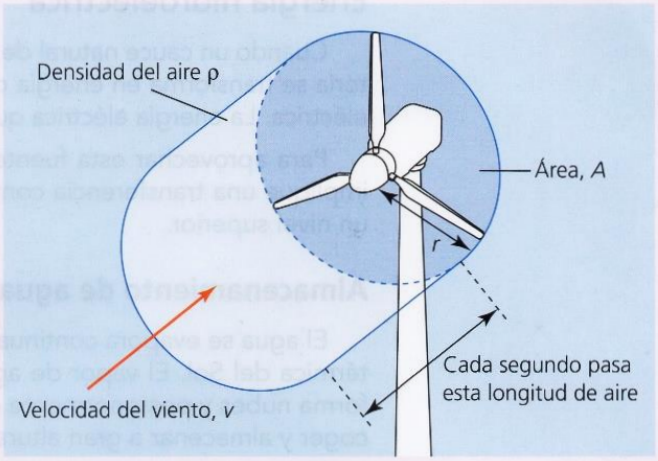


Figura 8.31
Sección transversal del viento que golpea las palas de una turbina eólica

1 Averigua por qué la mayoría de los aerogeneradores de eje vertical tiene tres palas.

31 Explica qué significa que la generación de energía eólica tenga una «densidad de energía» baja.

32 Las palas de un aerogenerador miden 18 m de largo. Si la eficiencia del generador es del 21%, ¿qué potencia de salida podemos esperar con un viento de 12 m s^{-1}? (Densidad del aire = 1,3 kg m^{-3}.)

33 Un aerogenerador tiene una potencia de salida de 10 kW cuando la velocidad del viento es de 8 m s^{-1}.
- **a** ¿Cuál debe ser la velocidad del viento para lograr una potencia de salida de 20 kW?
- **b** ¿Qué potencia de salida calculas que tendría otro generador con un diseño similar, pero con unas palas de longitud doble, si la velocidad del viento fuera de 16 m s^{-1}?

34 Una granja pequeña necesita una potencia media de 4 kW. Se va a instalar un aerogenerador en la parte superior de una torre en la que la velocidad media efectiva del viento es de 7,5 m s^{-1}. Calcula qué longitud deben tener las palas para generar esta potencia si el sistema tiene una eficiencia del 24%.

35 Los aerogeneradores de gran tamaño pueden producir 5 MW o más de energía eléctrica.
- **a** Estima el diámetro del círculo que describen las palas al girar. Enumera las hipótesis que has planteado.
- **b** Se necesita una potencia de salida de 20 MW. Analiza si es mejor instalar cuatro generadores iguales o un solo generador de tamaño doble.

36 **a** ¿Cuál debe ser el tamaño de los aerogeneradores (como los que se describen en la pregunta 35) para obtener 2 GW (potencia equivalente a una central eléctrica de gran tamaño alimentada con combustibles de origen fósil)?
- **b** Si la distancia que separa los aerogeneradores debe ser al menos de 300 m, ¿cuál es el área mínima que debe tener el terreno?
- **c** Indica un motivo por el que los generadores deben estar tan separados.

37 La velocidad del viento varía considerablemente y mencionar un valor «medio» puede ser engañoso, sobre todo si se usa un valor de la velocidad media para predecir una potencia media, como la que se ha calculado en la pregunta 34. Explica por qué se llegaría casi con toda seguridad a subestimar la potencia disponible.

38 Dibuja un diagrama de Sankey para representar las transferencias de energía que intervienen en un aerogenerador.

Energía hidroeléctrica

Cuando un cauce natural de agua desciende para salvar un desnivel, la energía potencial gravitatoria se transforma en energía cinética, que se puede usar para accionar turbinas y generar energía eléctrica. La energía eléctrica que se genera de esta forma se conoce como **energía hidroeléctrica**.

Para aprovechar esta fuente de electricidad a largo plazo, debe haber un proceso (*ciclo*) que implique una transferencia continua de energía, que es la que se necesita para retornar el agua a un nivel superior.

Almacenamiento de agua en lagos

El agua se evapora continuamente de los mares y océanos debido a la transferencia de energía térmica del Sol. El vapor de agua asciende como consecuencia de las corrientes de convección, forma nubes y posteriormente el agua vuelve a caer en forma de lluvia (o nieve), que se puede recoger y almacenar a gran altura en lagos, o en embalses artificiales contenida por presas.

Cuando se deja que el agua caiga, con frecuencia casi verticalmente, se puede generar energía eléctrica mediante las turbinas situadas en la parte inferior del salto de agua (véase la Figura 8.32). También se puede generar cantidades menores de energía eléctrica directamente de ríos caudalosos. Algunas de las centrales eléctricas más potentes del mundo son hidroeléctricas, como es el caso de la central de Itaipú en la frontera entre Brasil y Paraguay (Figura 8.33), aunque también hay un elevado número de diseños a menor escala que suministran electricidad a pequeñas comunidades en zonas remotas. Aproximadamente el 20% de la electricidad que se genera en el mundo procede de las centrales hidroeléctricas y es la fuente de energía renovable que más se utiliza a nivel global (para producir electricidad).

Figura 8.32
Sección transversal de una central hidroeléctrica

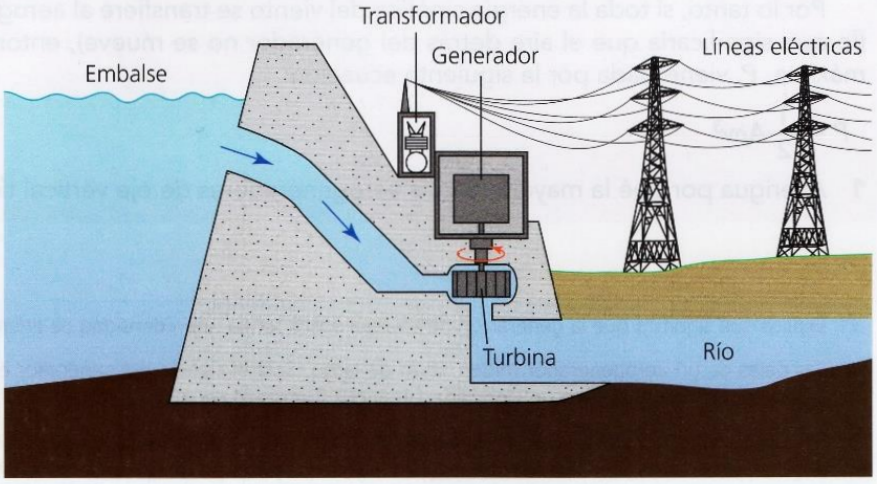


Figura 8.33
La central hidroeléctrica de Itaipú en la frontera entre Brasil y Paraguay



Almacenamiento de agua por bombeo

En zonas montañosas, la energía hidroeléctrica ofrece una solución a gran escala al problema del almacenamiento de exceso de energía que genera una central eléctrica. Las centrales eléctricas están diseñadas para funcionar a una determinada potencia de salida a la cual tienen su máxima eficiencia, pero de noche, cuando la mayoría de la gente duerme, normalmente hay menos demanda de energía eléctrica (véase la Figura 8.34). Algunas compañías eléctricas tratan de persuadir a los usuarios para que utilicen electricidad por la noche ofreciendo tarifas más baratas. Si las centrales funcionan a una potencia inferior por la noche, su eficiencia se reduce y hay una mayor cantidad de energía que se disipa en forma de energía térmica transferida al entorno. Es mejor mantener una central eléctrica funcionando aproximadamente a la misma potencia las 24 horas del día, almacenar el exceso de energía generada por la noche y transferirla de nuevo al sistema durante el día cuando la energía se puede vender a un precio más elevado. La forma más habitual de hacerlo es aprovechar el exceso de potencia para bombear agua a un lago situado a una altura mayor durante la noche, y después soltarla para que genere más potencia al día siguiente.

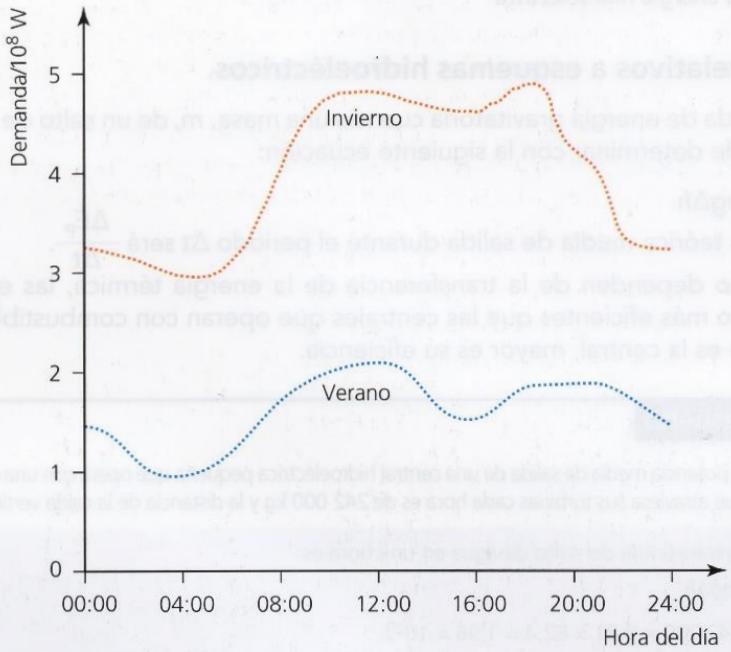


Figura 8.34
Variación diaria normal del consumo de energía generada en una gran central eléctrica en verano y en invierno

Las transformaciones de energía que pueden tener lugar en una central hidroeléctrica se muestran en la Figura 8.35. Las *mareas*, provocadas por la fuerza de atracción gravitatoria de la Luna, generan aumentos en el nivel del mar dos veces al día. El agua se puede embalsar en presas y soltar posteriormente cuando desciende el nivel del mar.

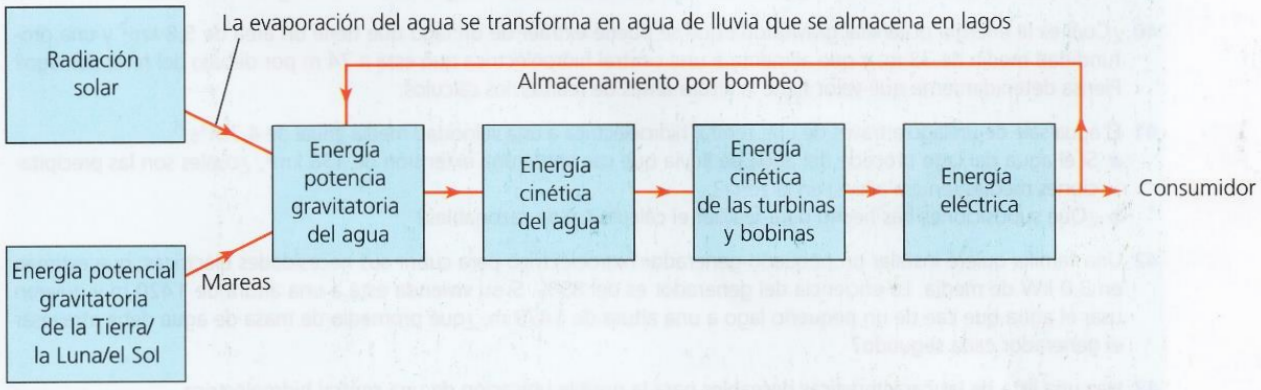


Figura 8.35
Diagrama de flujo de energía para las centrales hidroeléctricas

En la Tabla 8.5 se enumeran las ventajas y los inconvenientes de usar la energía hidroeléctrica.

Ventajas	Inconvenientes
• Es una fuente de energía renovable. • No emite gases de efecto invernadero (aunque probablemente los lagos de mayor tamaño emiten más metano). • Su eficiencia es relativamente alta. • Es una fuente de energía gratuita. • No genera contaminación durante su actividad. • Los embalses también se pueden usar para controlar el nivel de los ríos, mejorar el regadío y evitar inundaciones. • Los lagos de reciente formación pueden ser un recurso recreativo y ofrecer un hábitat nuevo para algunas plantas y animales. • Puede ser un recurso de energía idóneo para zonas remotas y montañosas.	• Afecta al medio ambiente y puede destruir el hábitat natural de muchas plantas y animales. • Los embalses de nueva construcción forman lagos que pueden inundar terrenos en los que había pueblos, ciudades, tierras de labor, etc. • Solo se puede usar en determinadas zonas (con relieve o montañosas). • Los proyectos a gran escala pueden suponer un coste elevado de construcción, aunque su mantenimiento es más razonable. • Se puede interrumpir el cauce natural de los ríos, lo que puede tener consecuencias no deseables. • Las centrales hidroeléctricas pueden estar muy alejadas de los centros de población, por lo que la energía se debe transferir a distancias muy largas. • La rotura de un embalse puede provocar daños considerables y pérdidas de vidas.

Tabla 8.5 *Ventajas e inconvenientes de la energía hidroeléctrica*

Cálculos relativos a esquemas hidroeléctricos

La pérdida de energía gravitatoria cuando una masa, m, de un salto de agua salva una distancia, Δh, se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$\Delta E_P = mg\Delta h$$

La potencia teórica media de salida durante el periodo Δt será $\frac{\Delta E_P}{\Delta t}$.

Como no dependen de la transferencia de la energía térmica, las estaciones hidroeléctricas serán mucho más eficientes que las centrales que operan con combustible. Normalmente, cuanto más grande es la central, mayor es su eficiencia.

Ejemplo resuelto

2 ¿Cuál es la potencia media de salida de una central hidroeléctrica pequeña que opera con una eficiencia del 92,0% si la masa de agua que atraviesa sus turbinas cada hora es de 242 000 kg y la distancia de la caída vertical es de 82,4 m?

La energía transferida del salto de agua en una hora es:

$$\Delta E_P = mg\Delta h$$

$$\Delta E_P = 242\,000 \times 9{,}81 \times 82{,}4 = 1{,}96 \times 10^8\,\text{J}$$

$$\text{Potencia máxima teórica} = \frac{\Delta E_P}{\Delta t} = \frac{1{,}96 \times 10^8}{3\,600} = 5{,}43 \times 10^4\,\text{W}$$

Potencia de salida = potencia de entrada × eficiencia = $5{,}43 \times 10^4 \times 0{,}920 = 5{,}00 \times 10^4$ W

39 Calcula la potencia máxima teórica que genera una central hidroeléctrica que aprovecha 2,0 m^3 de un salto de agua con una altura de 112 m cada segundo. Asume que la densidad del agua es de 1 000 kg m^{-3}.

40 ¿Cuál es la energía potencial gravitatoria que se puede extraer de un lago que tiene un área de 5,8 km^2 y una profundidad media de 33 m, y que alimenta a una central hidroeléctrica que está a 74 m por debajo del nivel del lago? Piensa detenidamente qué valor tiene la altura antes de realizar los cálculos.

41 El agua sale de un lago a través de una central hidroeléctrica a una velocidad media anual de 4,3 $m^3 s^{-1}$.

a Si el agua del lago procede del agua de lluvia que cae sobre una extensión de 138 km^2, ¿cuáles son las precipitaciones medias (en cm $año^{-1}$) en la zona?

b ¿Qué suposiciones has hecho para realizar el cálculo? ¿Son razonables?

42 Una familia quiere instalar un pequeño generador hidroeléctrico para cubrir sus necesidades eléctricas, que estiman en 3,0 kW de media. La eficiencia del generador es del 85%. Si su vivienda está a una altura de 1 420 m y quieren usar el agua que cae de un pequeño lago a una altura de 1 479 m, ¿qué promedio de masa de agua debe atravesar el generador cada segundo?

43 Haz una lista de las características deseables para la posible ubicación de una central hidroeléctrica.

44 Sugiere algunas «consecuencias no deseables» de una posible interrupción del cauce natural de río caudaloso por la construcción de una o varias presas.

45 En un sistema de almacenamiento por bombeo, el agua se bombea hasta un lago o embalse usando energía eléctrica y luego se deja caer de nuevo para que vuelva a generar electricidad. Obviamente, en este proceso se disipa cierta cantidad de energía. Explica por qué sigue siendo una buena alternativa.

Energía solar

La intensidad de la radiación solar que incide en una superficie se puede calcular con la fórmula siguiente:

$$\text{Intensidad} = \frac{\text{potencia}}{\text{área}}$$

$$I = \frac{P}{A}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

La intensidad de la radiación solar que llega a la Tierra es de unos 1 400 W m^{-2}. A esta cifra, aunque puede variar aproximadamente un 7%, se la conoce como **constante solar**. Corresponde a la potencia que atraviesa cada metro cuadrado perpendicular a los «rayos» solares cuando llegan a los límites exteriores de la atmósfera, tal como se muestra en la Figura 8.36. (Esta potencia es constante en todas las longitudes de onda del espectro de emisión solar, aunque la mitad está en la parte visible del espectro).

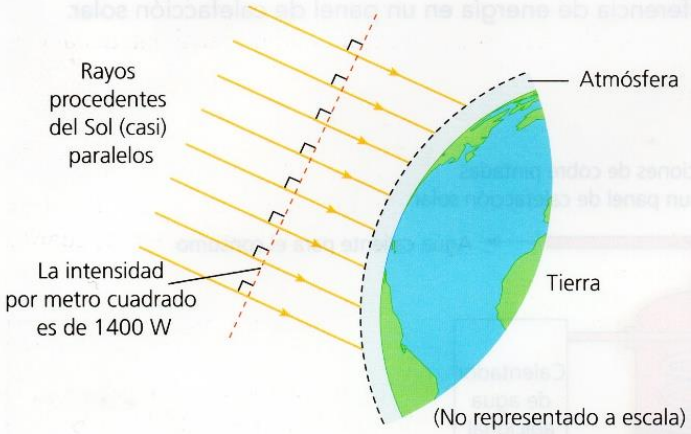


Figura 8.36
Radiación solar que llega a la Tierra

Esta cantidad de energía que incide sobre la Tierra es muy elevada, a pesar de que parte de la misma se absorbe, refleja o dispersa (se refleja aleatoriamente) en la atmósfera. Por ejemplo, en un día despejado cuando los rayos solares inciden a mediodía, la intensidad sobre la superficie de la Tierra es en ocasiones de 1 kW m^{-2}.

Un valor más útil, si la medición se hace durante 24 horas y en todo el planeta, es aproximadamente 230 W m^{-2}. Naturalmente, la energía que se transfiere por la radiación solar resulta esencial para todos los seres vivos que habitan la Tierra, y es importante recordar que es, o ha sido, el origen indirecto de la mayoría de los recursos energéticos que hemos tratado en este tema. Sin embargo, sorprendentemente apenas se ha hecho ningún uso de la transferencia *directa* de energía solar a otras formas de energía.

La radiación solar se puede usar directamente de dos formas: en los **paneles de calefacción solar** la energía radiante (solar) se transfiere para aumentar la energía interna del agua; en las **células fotovoltaicas** (también denominadas paneles fotovoltaicos o células solares) la energía solar se transfiere directamente en energía eléctrica. Las células fotovoltaicas se agrupan para formar los paneles solares, pero este nombre puede confundirse con los paneles de *calefacción* solar.

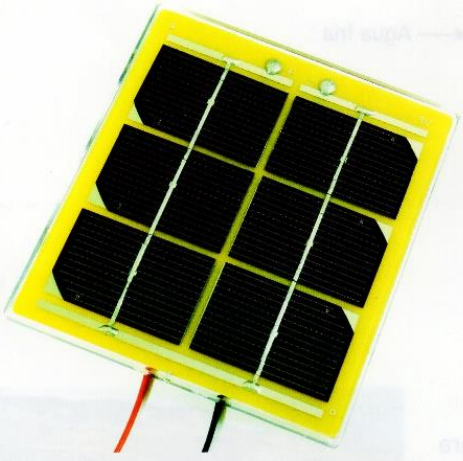


Figura 8.37
Células fotovoltaicas

Células fotovoltaicas

Cuando la radiación incide en el material semiconductor de una célula fotovoltaica, se desprenden electrones libres en el interior del material y se genera una diferencia de potencial.

Cuando se usan en un circuito, tanto la intensidad de corriente como la diferencia de potencial de una sola célula tienden a ser bajas, y también hay una resistencia interna significativa. De este modo, de forma individual son solo fuente de pequeñas cantidades de energía eléctrica (véase la Figura 8.37), pero si se conecta un número elevado de células se puede generar mucha más potencia. En la Figura 8.38 se muestra la transformación de energía que se produce en una célula fotovoltaica.

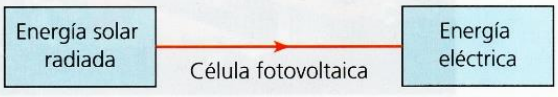


Figura 8.38
Flujo de energía para una célula fotovoltaica

Las células fotovoltaicas son probablemente la tecnología de energías renovables de crecimiento más rápido a nivel mundial. Los costes se están reduciendo rápidamente y las eficiencias aumentan, puesto que aunque la mayoría de las células solares funcionan a una eficiencia inferior al 20%, las más eficientes lo hacen casi al 25%, y en el futuro se espera llegar a superar el 40%. Debido a su conveniencia potencial y su coste reducido, se están realizando muchas investigaciones en el diseño de células fotovoltaicas de película delgada.



Figura 8.39
Alemania ha realizado inversiones significativas en energía fotovoltaica

Las células fotovoltaicas se usan (junto con las baterías recargables) para dispositivos de baja potencia (como las calculadoras) y para otros dispositivos individuales (como los teléfonos de urgencias), pero las mejoras en la tecnología y los reducidos costes permiten que actualmente se estén usando de forma generalizada para suministrar energía eléctrica suplementaria en viviendas y oficinas. En la fotografía de la Figura 8.39 se observa un ejemplo característico. También se están construyendo centrales solares para suministrar 100 MW (o más) de potencia a sistemas de redes eléctricas en todo el mundo.

Paneles de calefacción solar

En un panel de calefacción solar los tubos de cobre pintados de negro por los que circula el agua absorben la radiación del Sol (Figura 8.40). A continuación, el agua caliente se bombea a través de un intercambiador de calor en el que la energía térmica se transfiere del agua caliente a una gran cantidad de agua almacenada en un tanque aislado. Cuando el agua del tanque está suficientemente caliente, se puede usar en las viviendas para lavar, por ejemplo. Las viviendas con paneles de calefacción solar normalmente también disponen de otros medios para obtener agua caliente cuando esta no alcanza la temperatura necesaria. En la Figura 8.41 se muestra la transferencia de energía en un panel de calefacción solar.

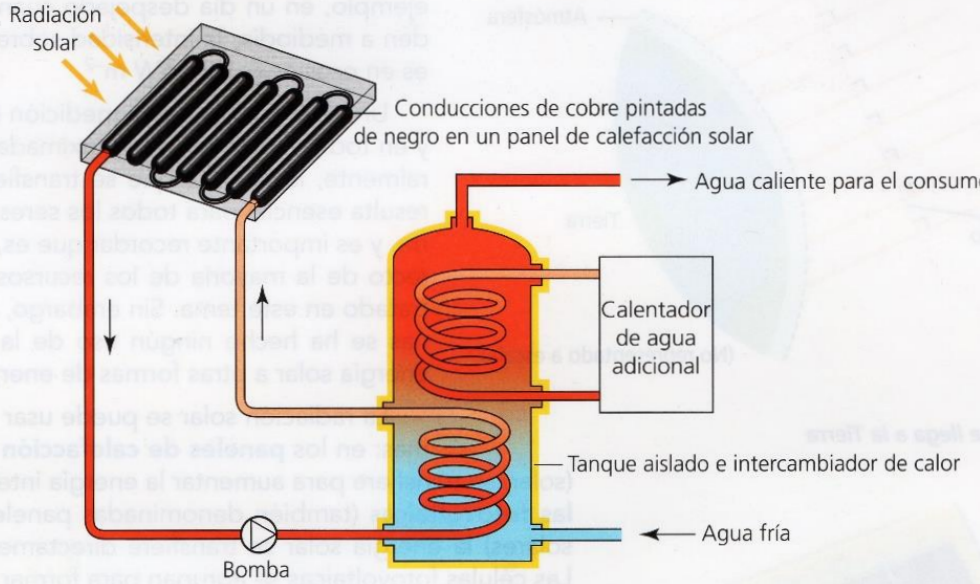


Figura 8.40
Un sistema de calefacción solar

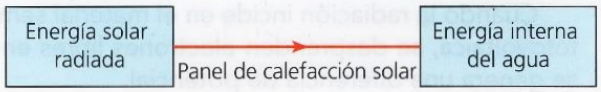


Figura 8.41
Flujo de energía para un panel de calefacción solar

Los paneles de calefacción solar se suelen usar para viviendas individuales y normalmente se colocan en el tejado. Su uso se ha generalizado en muchos países y son de mayor utilidad en aquellos lugares con clima cálido o soleado (Figura 8.42). Muchos gobiernos fomentan su uso o incluso exigen que en todas las viviendas nuevas se instalen paneles solares.



Figura 8.42
Paneles de calefacción solar en viviendas de Turquía

Variaciones en la intensidad de radiación que llega a la superficie terrestre

La intensidad de la radiación que incide en un lugar determinado de la superficie terrestre depende de:

- el tiempo o clima
- la latitud geográfica de la ubicación
- la hora del día o de la noche
- el ángulo de la superficie respecto a la horizontal de la ubicación.

En la Figura 8.43 se ilustra que ante una misma incidencia de energía solar en las zonas A y B, la intensidad (potencia/área) es menor en A porque su área es mayor. Este diagrama podría representar lugares en distintas latitudes de la Tierra o, para una ubicación dada, variaciones en la intensidad a diferentes horas del día o en diferentes épocas del año.

Para reducir el efecto de estas variaciones, las células fotovoltaicas o los paneles de calefacción solar no se suelen colocar en posición horizontal sobre el suelo, sino que se instalan de manera que reciben la radiación de forma perpendicular a una hora (media) del día o en una época del año seleccionadas cuidadosamente. Una opción que implica mayor coste es incluir los mecanismos necesarios para que los dispositivos se desplacen y se mantengan alineados.

Debemos tener en cuenta que si se coloca un panel para que reciba la máxima radiación a mediodía en invierno, la potencia recibida seguirá siendo menor que la que se obtiene a esa hora en verano, y esto se debe a que la radiación tiene que atravesar una distancia mayor en la atmósfera terrestre. Podemos comprobarlo si comparamos las distancias *P* y *Q* de la Figura 8.44.



Figura 8.43
La intensidad recibida de radiación solar varía con el ángulo de incidencia

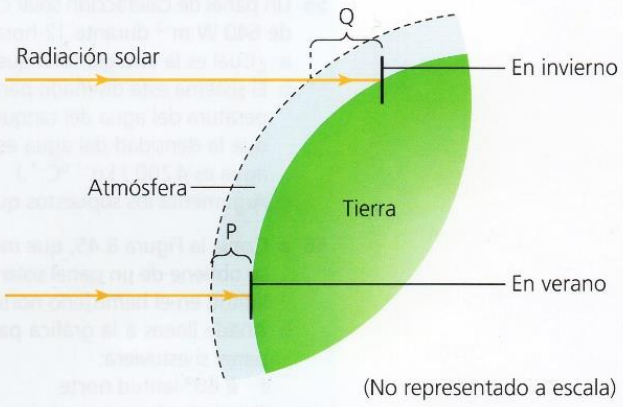


Figura 8.44
El efecto de la atmósfera en la intensidad de la radiación recibida en diferentes épocas del año

En la Tabla 8.6 se resumen las ventajas y los inconvenientes del uso de la radiación solar.

Ventajas	Inconvenientes
• Es una fuente de energía renovable. • Es una fuente de energía gratuita. • No genera contaminación. • Los costes de mantenimiento son reducidos. • Su vida útil normal es superior a 20 años.	• La variación de la potencia de salida de día o de noche, según el clima, la época del año, etc. (Esto significa que los sistemas individuales necesitan potencia o baterías suplementarias). • La construcción e instalación de las células fotovoltaicas y los paneles de calefacción solar son costosas (aunque se están abaratando significativamente). • Las células fotovoltaicas generan contaminación durante las fases de construcción y de reciclado al final de su vida útil. • Es una energía de baja densidad: se necesitan zonas extensas para construir centrales de energía fotovoltaicas.

Tabla 8.6
Ventajas e inconvenientes de la energía solar

46 **a** Calcula la cantidad total de energía radiada por el Sol que incide sobre la atmósfera superior de la Tierra en un año. (Asume que la distancia desde el centro de la Tierra al límite de la atmósfera es $6{,}5 \times 10^6$ m.)
b Compara tu respuesta con el consumo de energía anual del planeta, que se estima en 5×10^{20} J.

47 Las imágenes de las Figuras 8.36 y 8.44 no están hechas a escala. El radio de la Tierra es $6{,}4 \times 10^6$ m y la altura de la atmósfera se estima en 100 km. Usa un compás para dibujar un diagrama a escala de la Tierra y la atmósfera que la rodea.

48 Copia dos veces la Figura 8.43 y etiqueta (a) la variación de la intensidad con la hora del día, y (b) la variación de la intensidad con la época del año. Indica en cada diagrama la posición del eje de la Tierra y el polo norte. En (b) indica también la dirección de la rotación.

49 Sugiere dos motivos de la variación (de hasta el 7%) del valor de la constante solar.

50 Explica las distintas formas en las que el diseño de un sistema de calefacción solar (con tubos de cobre pintados de negro) como el que se muestra en la Figura 8.40 intenta maximizar la cantidad de energía térmica que se transfiere al agua del tanque.

51 **a** Dibuja un circuito eléctrico que te permita investigar de qué forma la intensidad de la luz afecta a la diferencia de potencial que se crea en una célula fotovoltaica y la corriente que la atraviesa.
b ¿Cómo puedes usar los datos para determinar la resistencia interna de una célula?

52 Una célula fotovoltaica de 1,8 cm^2 de área recibe una radiación estimada de 700 W m^{-2}.
a ¿Qué energía eléctrica se genera si su eficiencia es del 18%?
b Si el voltaje en la célula es 0,74 V, calcula la corriente que la atraviesa.
c ¿Cuántas células se necesitan para obtener una potencia de salida de 50 W?
d ¿Cuál sería el área total de las células?

53 **a** Utiliza Internet para obtener la estimación actualizada del consumo de energía eléctrica en todo el mundo.
b Usa los valores estimados de la potencia media radiada sobre la superficie terrestre, las zonas más comunes y las eficiencias de las células fotovoltaicas para calcular un valor aproximado del área de las células que se necesitarían para abastecer todas las necesidades de energía eléctrica del mundo.

54 Imagina que se va a colocar un panel de calefacción solar en una posición fija sobre el tejado de una vivienda de tu pueblo o ciudad. Analiza cuál sería la dirección más óptima para fijarla.

55 Un panel de calefacción solar con un área de 3,4 m^2 se coloca de tal modo que en un día recibe una intensidad media de 640 W m^{-2} durante 12 horas de luz diurna.
a ¿Cuál es la energía total que incide en el panel durante ese día?
b El sistema está diseñado para transferir esta energía a un tanque de agua de 0,73 m^3. Si al comenzar el día la temperatura del agua del tanque es de 2 °C, ¿cuál es la máxima temperatura posible del agua al final del día? (Asume que la densidad del agua es 1 000 kg m^{-3} y que la capacidad calorífica específica del agua es 4 200 J kg^{-1} $°C^{-1}$.)
c Argumenta los supuestos que has tenido en cuenta.

56 **a** Copia la Figura 8.45, que muestra cómo varía la predicción de energía total diaria que se obtiene de un panel solar fijo (o célula solar) a lo largo del año en un lugar a 30° de latitud en el hemisferio norte.
b Añade líneas a la gráfica para mostrar la energía diaria que se estima para el mismo panel si estuviera:
i a 60° latitud norte
ii a latitud cero, en el ecuador
iii a 30° latitud sur.
c Indica dos motivos por los que la energía total diaria obtenida se reduce al aumentar la latitud.

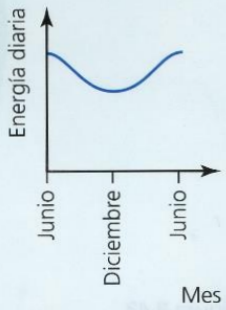


Figura 8.45

Aplicaciones

Energía geotérmica

En ciertas zonas del planeta, el hombre ha usado las aguas termales durante miles de años para bañarse y para calentar habitaciones. En los últimos años la atención se ha dirigido a la extracción de *energía geotérmica*, con el objetivo de reducir los efectos adversos del uso de combustibles de origen fósil.

Desde su formación, el centro de la Tierra ha tenido temperaturas extremadamente altas, y se ha mantenido a estas temperaturas en parte por la energía liberada en la desintegración de los materiales radiactivos. Parte de esta energía interna se transfiere continuamente como energía térmica a las rocas situadas cerca de la superficie terrestre.

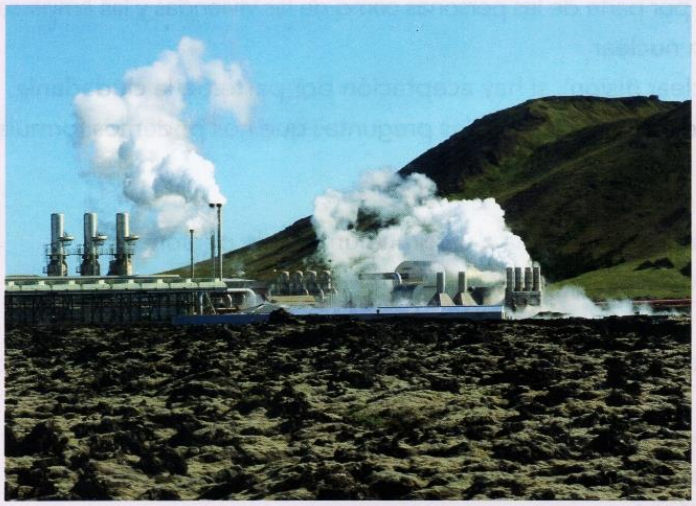


Figura 8.46
Islandia obtiene aproximadamente el 30% de sus necesidades energéticas de la energía geotérmica

Un ejemplo extremo de este efecto son los volcanes, y el uso de la energía geotérmica se realiza mayoritariamente (pero no de forma exclusiva) en países conocidos por su actividad volcánica.

Actualmente, la energía geotérmica genera mucho menos del 1% de las necesidades totales del planeta, pero hay tres países que generan cada uno más del 25% de su energía eléctrica a partir de la energía geotérmica: Islandia (Figura 8.46), Filipinas y El Salvador.

En algunos lugares la energía se encuentra disponible directa y convenientemente en forma de agua caliente, pero en otros lugares el agua se debe bombear para que alcance las rocas que se encuentran a elevadas temperaturas y a una gran profundidad. La aplicación más común y eficiente de la energía geotérmica se consigue con el uso directo del agua caliente para calefacción, pero si las temperaturas son lo suficientemente elevadas, se puede incluso generar electricidad.

1 ¿Dónde se encuentran los «spas» o las fuentes termales más cercanas al lugar en el que resides? ¿A qué temperatura está el agua y para qué se utiliza?

2 Busca toda la información que puedas en Internet sobre una central geotérmica concreta en cualquier parte del mundo. Prepara una presentación para el resto del grupo. (Responde a preguntas como estas: ¿Por qué es esa su ubicación? ¿Han tenido los ingenieros que cavar en la corteza terrestre o se puede acceder a la energía cerca de la superficie? ¿La energía interna se encuentra principalmente en las rocas o en el agua? ¿Cómo es la energía que se transfiere para su uso? ¿Se genera contaminación? ¿Cuál es la potencia de salida útil? ¿Cuál es la eficiencia?). Asegúrate de usar términos como «energía térmica» y «energía interna». Intenta no utilizar el término «calor».

Investigación energética

La dependencia que tiene el mundo actual de los combustibles de origen fósil no renovables no se puede prolongar de forma indefinida. Es muy urgente que se desarrollen nuevas fuentes de energía, sobre todo porque la población mundial sigue aumentando y muchos habitantes de los países en vías de desarrollo esperan mejorar su nivel de vida. Al mismo tiempo, el cambio climático y otros problemas medioambientales son realmente preocupantes, por lo que resulta vital que las fuentes de energía no empeoren esta situación.

Estos problemas ahora son bien conocidos en todo el mundo, pero no se deben subestimar ni olvidar a causa de una familiarización excesiva. Numerosos científicos e ingenieros de distintas ramas de la ciencia colaboran llevando a cabo un gran número de investigaciones científicas y tecnológicas en muchos países diferentes, pero evidentemente esta no es una cuestión que deban abordar únicamente la ciencia y la tecnología: los individuos y sociedades deben aceptar su responsabilidad y realizar cambios guiados por los políticos y gobiernos.

El sector económico también desempeña un importante papel en la introducción de nuevas tecnologías. Las empresas, ya sean grandes o pequeñas, por lo general aceptan invertir en investigación si pueden obtener beneficios posteriormente. Se trata de una situación empresarial nueva; una idea novedosa que puede parecer inicialmente antieconómica, pero volverse rentable si se introduce a gran escala.

Estas son algunas de las áreas en continuo desarrollo:

- descubrimiento de nuevas reservas de combustibles de origen fósil
- desarrollo de nuevas tecnologías (por ejemplo, el *fracking*) para extraer combustibles de origen fósil que previamente no eran rentables
- nuevas ideas y tecnologías creativas para fuentes de energía renovable
- programas de educación y formación a personas de todo el mundo (incluida la necesidad de controlar el crecimiento demográfico)

- uso más eficiente de la energía, tanto por parte de las personas como de las viviendas y las empresas
- investigación continua sobre fusión nuclear
- incremento del uso de energía nuclear (fisión), si hay aceptación por parte de la ciudadanía.

En la siguiente lista se incluyen algunas de las principales preguntas que nos podemos formular sobre los diferentes tipos de centrales eléctricas:

- ¿Se trata de una fuente de energía renovable?
- ¿Puede suministrar grandes cantidades de energía a un gran número de personas?
- ¿Emite gases de efecto invernadero?
- ¿Es una fuente de energía gratuita o cara?
- ¿Implica costes elevados o una gran dificultad transferir la fuente de energía a la central eléctrica?
- ¿Tiene la fuente una densidad de energía elevada?
- ¿Es el suministro de energía razonablemente constante y predecible?
- ¿Es eficiente el proceso energético?
- ¿Se genera contaminación durante su funcionamiento?
- ¿Se genera contaminación durante su construcción o durante la eliminación de los residuos?
- ¿Provoca otros efectos adversos sobre el ambiente o las personas?
- ¿Su construcción e instalación son difíciles o costosas?
- ¿Resulta el equipamiento difícil de mantener?
- ¿Cuánto tiempo debe transcurrir para su sustitución?
- ¿Existen muchas ubicaciones adecuadas para este tipo de centrales eléctricas?
- ¿Hay posibles ubicaciones de centrales eléctricas cerca de pueblos y ciudades?

8.2 Transferencia de energía térmica

Con la finalidad de crear un modelo simplificado, la Tierra se puede considerar un radiador de cuerpo negro y la atmósfera, un cuerpo gris

Todos los objetos emiten ondas electromagnéticas, con mayor frecuencia en la zona infrarroja del espectro. Cuanto más grande es un objeto y más elevada es su temperatura, más radiación emite. El Sol, obviamente, es muy grande y se encuentra a una temperatura muy alta, por lo que emite una gran cantidad de energía ($3{,}84 \times 10^{26}$ W). La mayor parte de la energía que usamos en la Tierra procede originalmente del Sol y llega en forma de ondas electromagnéticas. En esta sección vamos a tratar aspectos como la energía que llega a la Tierra procedente del Sol, la energía absorbida, la energía reflejada y el efecto que todo esto tiene en la temperatura media del planeta.

Pero primero vamos a resumir las tres formas de transferencia de energía térmica (calor), y luego describiremos cómo se puede cuantificar la radiación térmica.

Conducción, convección y radiación térmica

Conducción térmica

Si las distintas partes de una sustancia se encuentran a diferentes temperaturas, la parte más caliente contiene partículas con energía cinética aleatoria más elevada. La **conducción térmica** es el proceso por el que esta energía se expande y se transfiere de unas partículas a otras, mediante «colisiones», a la parte más fría de la sustancia (o a otra sustancia). Véase la Figura 8.47.

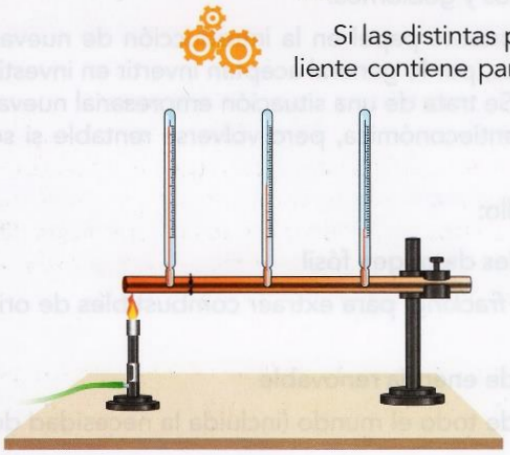


Figura 8.47
Energía térmica que se conduce en una barra de metal

La conducción puede darse en sólidos, líquidos y gases, pero el proceso es más rápido cuando hay fuerzas intensas que actúan sobre las partículas y estas se mantienen juntas. Por este motivo, la conducción suele ser mejor en los sólidos que en los líquidos, y la conducción en los líquidos suele ser mejor que en los gases. El agua que queda atrapada en el traje de neopreno del *windsurfista* que se muestra en la Figura 8.48 es un mal conductor térmico y es lo que le mantiene caliente.

Los metales son buenos *conductores* del calor porque los electrones libres también transfieren energía. La mayoría de los no metales son malos conductores del calor (son buenos *aislantes*).



Figura 8.48
Los trajes de neopreno son buenos aislantes térmicos porque el agua que entra es un mal conductor

Naturaleza de la ciencia

La utilidad de las analogías

La conducción eléctrica y la conducción térmica tienen muchas semejanzas. En el Capítulo 5 hemos visto cómo se necesita una diferencia de potencial para conducir un flujo de carga a través de una resistencia eléctrica. Simplemente por analogía, podemos sugerir (correctamente) que debe haber una diferencia de temperatura para conducir un flujo de energía térmica a través de una resistencia térmica. La resistividad térmica se puede considerar análoga a la resistividad eléctrica. Se pueden usar ecuaciones similares para representar ambos tipos de conducción, incluso para el flujo de agua por una tubería.

En los Capítulos 5 y 6 hemos estudiado otra analogía muy relevante: las fuerzas gravitatoria y eléctrica entre puntos se representan mediante ecuaciones similares.

Convección térmica

Cuando se calienta un líquido, las moléculas tienen una mayor energía cinética aleatoria y hay mayor separación entre ellas, por eso decimos que el líquido se **expande**. De forma similar, un gas se puede expandir cuando se calienta, pero *solo* si no se encuentra en un contenedor que evite su expansión.

Cuando *parte* de un fluido (gas o líquido) se calienta, las moléculas se separan y la densidad se reducirá de forma localizada. La parte más caliente del fluido asciende y circula sobre la parte del fluido que está a menos temperatura, y que tiene una mayor densidad. A este desplazamiento de la energía térmica y del fluido se le denomina **convección térmica**. Es frecuente que la convección genere una *circulación* de un gas o de un líquido. Las corrientes de convección del aire y del agua son de gran importancia en el estudio de los patrones meteorológicos y del clima. En la Figura 8.49 se incluye un ejemplo simple: durante el día, la tierra se calienta más rápido que el mar porque tiene un calor específico menor; la energía térmica se transfiere al aire, que asciende.



Figura 8.49
Corrientes de convección diurnas cerca de la playa

Hay muchos ejemplos destacados de corrientes de convección, como las corrientes oceánicas y el desplazamiento de las rocas fundidas bajo la superficie terrestre.

Radiación térmica

Las distintas interacciones de las partículas que forman toda la materia provocan la emisión de radiación electromagnética. Este proceso sucede en *toda* la materia y a *todas* las temperaturas por encima del cero absoluto (0 K). Esta radiación (normalmente infrarroja) se denomina **radiación térmica**. En la Figura 8.50 se representa un sencillo experimento de laboratorio para comparar la influencia de las superficies de contenedores idénticos en el proceso de enfriamiento. En la Figura 8.51 se muestra otro experimento para comparar la influencia de las superficies de contenedores idénticos en el aumento de su temperatura.

Este tipo de experimentos demuestran que las superficies oscuras son buenas *emisoras* de radiación térmica y *absorben* bien la radiación térmica. Del mismo modo, las superficies blancas no emiten ni absorben bien la radiación, pero son buenas *reflectoras*. Aunque el principio es sencillo, en la práctica estos dos experimentos básicos pueden generar resultados poco convincentes.

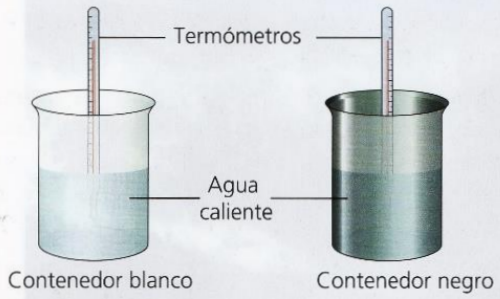


Figura 8.50
Comparación de pérdidas de radiación térmica

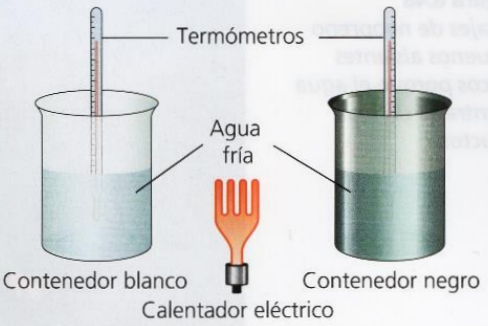


Figura 8.51
Comparación de incrementos de radiación térmica

La energía térmica que se transfiere entre los objetos cotidianos normalmente provoca conducción, convección y radiación al mismo tiempo. Los sólidos son los mejores conductores, la convección solo tiene lugar en los fluidos y la radiación puede darse en el vacío. La radiación térmica es *mucho* más significativa a temperaturas elevadas.

Radiación de un cuerpo negro

El concepto de *cuerpo negro* es fundamental para entender la radiación térmica.

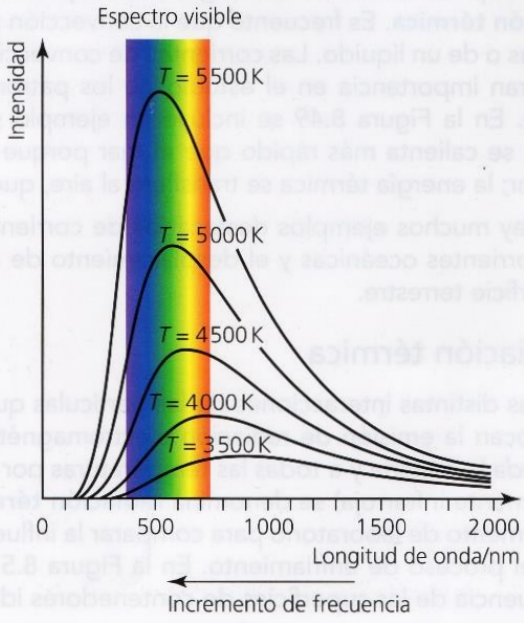
Un **cuerpo negro** perfecto es un objeto idealizado que absorbe *toda* la radiación electromagnética que incide sobre él.

Como no refleja luz, se ve de color negro (a menos que alcance una temperatura elevada y emita luz visible).

Cualquier cuerpo que absorbe bien la radiación es también un buen emisor de radiación. La radiación que emite un emisor «perfecto» se conoce como **radiación de cuerpo negro**. Recordemos que si el objeto tiene la suficiente temperatura para emitir luz visible, no se verá de color negro.

Un objeto no puede emitir toda su energía en todas las frecuencias en un instante, por lo que podemos definir la radiación de cuerpo negro (perfecto) mediante gráficas que muestren la distribución de intensidad para las diferentes frecuencias emitidas. En la Figura 8.52 se compara la radiación que emiten los cuerpos negros a diferentes temperaturas.

Figura 8.52
Espectros de radiación de cuerpo negro a diferentes temperaturas



Cuando un objeto se calienta, emite más radiación en todas las frecuencias, de forma que la gráfica se desplaza cuando las temperaturas son más elevadas. Sin embargo, es muy importante que observemos que la distribución de frecuencias/longitudes de onda también varía, de modo que los mayores incrementos se producen con las menores longitudes de onda. El valor máximo de longitud de onda se desplaza a un valor inferior (mayor frecuencia).

El eje vertical de la gráfica representa la intensidad (potencia emitida por unidad de área) de una superficie sobre un intervalo reducido de longitudes de onda. El área bajo la gráfica es un indicador de la potencia total emitida por unidad de área.

La temperatura de la superficie solar es de unos 5 800 K y la temperatura media de la superficie terrestre de unos 288 K (demasiado baja para que se muestre con claridad en la escala que se ha usado en la Figura 8.52). Si asumimos que los dos se comportan aproximadamente como cuerpos negros perfectos, podemos comparar la radiación que emite el Sol y la que emite la Tierra. La radiación solar que llega a la Tierra procedente del Sol es 50% luz visible y 50% luz infrarroja, con pequeñas cantidades de ultravioleta y otras radiaciones. La intensidad de la radiación que emite la Tierra es mucho menor y se encuentra en su totalidad en la zona infrarroja del espectro electromagnético. Tal como estudiaremos más adelante en este capítulo, debido a esta diferencia en el espectro de las radiaciones de entrada y salida, los gases de efecto invernadero que hay en la atmósfera de nuestro planeta absorben una proporción mucho mayor de radiación terrestre que de radiación solar.

Cálculo de la potencia radiada emitida

La potencia total radiada de *cualquier* superficie depende solo de tres variables:

- área de la superficie, A
- temperatura de la superficie, T
- naturaleza de la superficie.

Debemos considerar que la potencia emitida depende de la naturaleza de la superficie, *no* de la propia sustancia.

La potencia emitida varía considerablemente con los cambios de temperatura, y este principio es el que establece la **ley de Stefan Boltzmann**, según la cual, para un cuerpo negro perfecto la potencia total emitida por unidad de área es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura (absoluta):

$$\frac{\text{potencia}}{\text{área}} \propto T^4$$

La potencia, P, que emite un cuerpo negro perfecto viene dada por la siguiente ecuación:

$$P = \sigma A T^4$$

Donde σ es una constante. Se denomina **constante de Stefan-Boltzmann** y su valor es $5{,}67 \times 10^{-8}\ \text{W m}^{-2}\ \text{K}^{-4}$. (Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*).

El término *cuerpo gris* se usa en ocasiones para describir los objetos que no son cuerpos negros perfectos; esta ecuación se puede adaptar fácilmente a este tipo de objetos usando el concepto de **emisividad**, e, de una superficie.

El valor de la emisividad es un número entre cero y uno; un cuerpo con una emisividad de 1 es un cuerpo negro perfecto que emite la máxima potencia; una emisividad de 0,5 representa una superficie que emite el 50% de la potencia máxima.

La emisividad se define como la potencia que radia una superficie dividida por la potencia que radia un cuerpo negro con la misma área superficial y temperatura. La emisividad es un porcentaje y, por lo tanto, no tiene una unidad.

$$\text{emisividad} = \frac{\text{potencia que radia una superficie}}{\text{potencia que radia un cuerpo negro con la misma área de superficie y temperatura}}$$

Las superficies oscuras tienen una emisividad elevada, lo que significa que radian bien el calor, pero también lo absorben bien. Las superficies claras tienen una emisividad baja, por lo que no radian bien el calor, aunque tampoco lo absorben bien. La emisividad media de la Tierra (y su atmósfera) es 0,61.

Por consiguiente, la ley de Stefan-Boltzmann para la potencia que emite *cualquier* superficie es:

$$P = e\sigma A T^4$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Ejemplo resuelto

3 La potencia del Sol es $3{,}8 \times 10^{26}$ W y la temperatura de su superficie 5 780 K. Si asumimos que se comporta como un cuerpo negro perfecto, calcula su radio.

$$P = e\sigma AT^4$$

$$3{,}8 \times 10^{26} = 1 \times (5{,}67 \times 10^{-8}) \times (4\pi r^2) \times 5\,780^4$$

$$r^2 = \frac{3{,}8 \times 10^{26}}{7{,}95 \times 10^{8}}$$

$$r = 6{,}9 \times 10^{8}\,\text{m}$$

Ley del desplazamiento de Wien

La variación en la longitud de onda a la que un cuerpo negro emite la potencia máxima (véase la Figura 8.52) se puede representar matemáticamente mediante la siguiente ecuación (conocida como ley del desplazamiento de Wien):

$$\lambda_{máx}\,(\text{metros}) = \frac{2{,}90 \times 10^{-3}}{T\,(\text{kelvin})}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*. (Recuerda que la temperatura debe estar en kelvin).

Esta es una *ley empírica*, determinada por la investigación.

Ejemplo resuelto

4 La temperatura de la superficie solar es 5 780 K.

a ¿A qué longitud de onda se emite la máxima radiación?

b ¿Qué hipótesis has utilizado?

c ¿En qué parte del espectro visible se encuentra esta longitud de onda?

a $\lambda_{máx}\,(\text{metros}) = \dfrac{2{,}90 \times 10^{-3}}{T\,(\text{kelvin})}$

$$\lambda_{máx} = \frac{2{,}90 \times 10^{-3}}{5\,780}$$

$$\lambda_{máx} = 5{,}02 \times 10^{-7}\,\text{m}$$

b Que el Sol es un cuerpo negro perfecto (lo que es casi cierto).

c En la región verde.

57 Describe experimentos simples de laboratorio que demuestren el flujo de energía térmica mediante **a** conducción, **b** convección.

58 Indica los motivos por los que los experimentos de la Figura 8.50 y de la Figura 8.51 «pueden producir resultados poco convincentes».

59 Señala un ejemplo cotidiano de:

a una superficie oscura que absorba bien la energía térmica

b una superficie oscura que emita bien la energía térmica

c una superficie blanca o brillante que refleje bien la energía térmica

d una superficie blanca o brillante que no emita bien la energía térmica.

60 Una estrella tiene un radio de $8{,}3 \times 10^{7}$ m y una temperatura en su superficie de 7 500 °C.

a Calcula la potencia que emite.

b ¿Qué hipótesis has utilizado?

c ¿Cuál es la intensidad a una distancia de $2{,}4 \times 10^{12}$ m de la estrella?

61 **a** Estima el área superficial media de una persona adulta desnuda.

b Si la emisividad de la piel es 0,95, calcula la potencia que radia un cuerpo desnudo si la temperatura de la piel es de 33 °C.

c ¿De qué otra forma pierde calor el cuerpo?

d Tus respuestas pueden sugerir que un cuerpo desnudo pierde calor muy rápidamente. Explica por qué esta sugerencia probablemente no es cierta.

62 a Si la temperatura de un objeto aumenta de 285 K a 312 K, ¿cuál es el incremento del porcentaje en la radiación que emite?
b La temperatura de un objeto es 20 °C. ¿A qué temperatura tenemos que calentarlo para que se duplique la potencia de la radiación emitida?

63 Cuando pasa la corriente por una bombilla incandescente, la temperatura del filamento aumenta hasta que la energía térmica que irradia es igual a la energía eléctrica que suministra. Calcula la temperatura de funcionamiento de una bombilla de 40 W si el filamento tiene un área superficial de $1{,}2 \times 10^{-5}$ m^2. (Asume que se comporta como un cuerpo negro perfecto).

64 Una bombilla halógena con filamento de tungsteno funciona a una temperatura de 3 500 K.
a ¿A qué longitud de onda se emite la máxima radiación?
b Explica por qué la luz de este tipo de bombillas es diferente de la luz de una bombilla incandescente que funciona a 2 800 K.

Aplicaciones

Uso de la radiación térmica para determinar temperaturas

1 Si un objeto no alcanza la temperatura suficiente para emitir luz visible, podemos estimar cuál es su temperatura a partir de su color. Por ejemplo, si calentamos el acero justo a la temperatura a la que emite luz (roja) visible, estará a unos 600 °C. Si aumentamos más esta temperatura, también emitirá luz naranja, y después amarilla. A la temperatura aproximada de 1 000 °C se emite un efecto global de luz amarilla, mientras que la emisión de radiación en todo el espectro visible emite luz blanca a unos 1 300 °C.

2 La temperatura de la superficie de las estrellas, incluido el Sol, se puede determinar a partir de un análisis detallado de la radiación que emiten. Si se define la longitud de onda de máxima intensidad, se puede usar la ley de Wein para calcular la temperatura. Estos cálculos se explican con más detalle en la Opción D: Astrofísica.



3 Las cámaras de infrarrojo se pueden usar para crear imágenes de forma similar a como lo hacen las cámaras de luz visible. Como todos los objetos emiten luz infrarroja, tienen la ventaja de poder crear imágenes de objetos aunque no haya luz visible. (Cualquier color que aparezca en las imágenes se añade artificialmente.) La calidad de las imágenes no es tan buena como cuando hay luz visible porque se usan longitudes de onda más largas. Si se puede determinar la potencia radiada en cualquier punto de un objeto, en principio su temperatura se puede *estimar* usando la ecuación $P = e\sigma AT^4$, aunque se debe hacer una suposición sobre la emisividad. De este modo es posible fabricar *termógrafos*, que tienen una gran variedad de usos, como el escaneado de los aeropuertos (Figura 8.53).

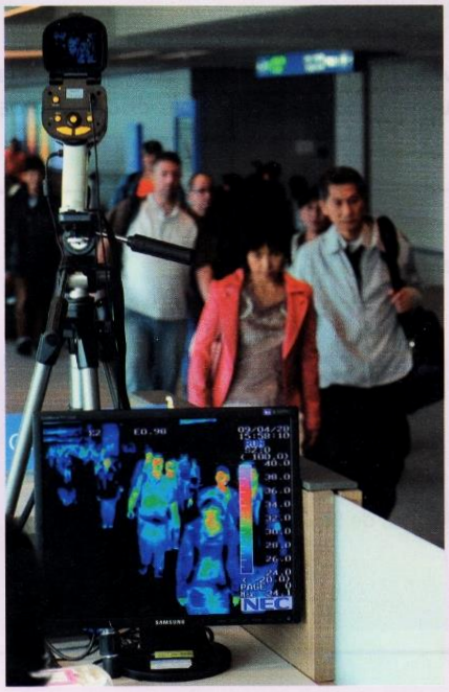


Figura 8.53
Escáner térmico en el aeropuerto de Incheon, Corea del Sur

1 Usa Internet para crear una lista que incluya al menos cinco usos distintos de la termografía de infrarrojos.

2 Busca información sobre cómo detectan las cámaras de infrarrojos las diferentes intensidades de radiación.

3 ¿Qué ventajas e inconvenientes tiene el uso de los termómetros de infrarrojos para medir la temperatura del cuerpo humano?

La radiación solar

La constante solar

Si asumimos que la radiación térmica solar se propaga por igual en todas las direcciones sin que haya absorción, entonces, a una distancia r del Sol la misma potencia atraviesa un área $4\pi r^2$ (el área de la superficie de una esfera imaginaria), tal como se muestra en la Figura 8.54.

Figura 8.54
Difusión de la radiación solar



Como:

$$\text{intensidad, } I = \frac{\text{potencia, } P}{\text{área, } A}$$

La intensidad a diferentes distancias, r, del Sol se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

La intensidad sigue la ley del inverso del cuadrado de la distancia a la fuente (tal como hemos explicado en el Capítulo 4). Esta ecuación *no* figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Ejemplo resuelto

5 Calcula la intensidad de la radiación solar que llega a:
a la Tierra
b Mercurio.

a La distancia media entre la Tierra y el Sol es de 150×10^6 km, por lo tanto:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} = \frac{3{,}84 \times 10^{26}}{4 \times \pi \times (150 \times 10^9)^2}$$

$$I = 1{,}36 \times 10^3 \text{ W m}^{-2}$$

b La distancia media entre Mercurio y el Sol es de 58×10^6 km, por lo tanto:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} = \frac{3{,}84 \times 10^{26}}{4 \times \pi \times (58 \times 10^9)^2}$$

$$I = 9{,}1 \times 10^3 \text{ W m}^{-2}$$

El resultado para la Tierra calculado en el Ejemplo resuelto 5 se ha usado antes en este capítulo en la sección de la energía solar. Se denomina *constante solar*, S, y representa la intensidad media que incide sobre un área situada por encima de la atmósfera de la Tierra y que es perpendicular a

la dirección en la que se desplaza la radiación. Se ha medido desde satélites en órbita y su valor se ha estimado en 1 361 W m^{-2}. Este valor figura en el *Apéndice de datos de Física*.

constante solar, $S = 1{,}36 \times 10^3 \text{W m}^{-2}$

Se han detectado *ligeras* variaciones en la constante solar debido al cambio periódico en la potencia de salida del Sol, así como diferencias en la distancia entre la Tierra y el Sol en las distintas épocas del año.

Albedo y emisividad

Por término medio, aproximadamente el 30% de la radiación solar que incide sobre la Tierra y su atmósfera, se refleja o se dispersa en el espacio, pero hay considerables variaciones de unos sitios a otros y en los distintos momentos del día y del año.

El **albedo** es la relación entre la potencia total que se dispersa o refleja y la potencia total que incide.

$$\text{albedo} = \frac{\text{potencia total que se dispersa}}{\text{potencia total incidente}}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Al albedo se le asigna en ocasiones el símbolo α. Cuando el valor de un albedo es 1 significa que *toda* la radiación se dispersa o refleja. Cuando el valor es 0, significa que toda la radiación se absorbe, y *ninguna* se dispersa o refleja. Las superficies blancas y brillantes (como la nieve, el hielo y las nubes) tienen un albedo muy elevado porque reflejan mucha radiación incidente. También tienen una emisividad baja. Las superficies más oscuras (como el agua), que tiene una mayor emisividad, tienen un albedo inferior porque absorben más radiación incidente (Figura 8.55).

Los objetos que son buenos emisores de radiación (elevada emisividad) también absorben bien la radiación. Una superficie que absorbe bien la radiación, y por lo tanto no la refleja bien (bajo albedo), también tendrá una elevada emisividad.

El albedo también varía con el ángulo de incidencia (que a su vez varía con la inclinación de la superficie, la estación del año, la latitud y el momento del día). El valor aproximado del albedo medio de la Tierra es 0,30 (30%), tal como se ha mencionado antes.



Figura 8.55
La nieve tiene un albedo alto, pero el albedo del agua es bajo

65 Usa la constante solar y el radio de la Tierra ($6{,}37 \times 10^6$ m) para demostrar que la energía total radiada que llega a la Tierra procedente del Sol es $1{,}74 \times 10^{17}$ cada segundo.

66 La potencia total radiada que llega a un planeta procedente de una estrella es $2{,}82 \times 10^{17}$ W. El radio de la órbita que describe el planeta alrededor de la estrella mide $1{,}23 \times 10^7$ m.
- **a** Calcula la intensidad de la radiación que llega al planeta (perpendicular a la dirección de la radiación).
- **b** Si el albedo medio del planeta es 0,22, calcula la intensidad media de la radiación que emite el planeta en todas las direcciones.

67 Uno de los planetas de nuestro sistema solar recibe radiación solar con una intensidad de unos 15 W m^{-2}. Calcula su distancia al Sol y después averigua de qué planeta se trata.

68 Una pequeña bombilla es la única fuente de luz que hay en una habitación oscura. Emite radiación visible con una potencia de 5 W. ¿Cuál es la intensidad que recibe un libro situado a 90 cm de la bombilla?

69 Indica los posibles motivos por los que el albedo medio en un lugar determinado es:
- **a** diferente en invierno que en verano
- **b** diferente en los distintos momentos del mismo día.

70 Dos planetas orbitan alrededor de una estrella distante. El planeta A está a 100 millones de kilómetros de la estrella y recibe una intensidad de 860 W m^{-2}. ¿Cuál es la intensidad que recibe el planeta B si se encuentra a 120 millones de kilómetros de la estrella?

El efecto invernadero

La Tierra recibe una media aproximada de $1{,}74 \times 10^{17}$ J de energía radiada del Sol cada segundo (Figura 8.56). Si la Tierra a su vez refleja o radia energía al espacio en la misma proporción, entonces estará en *equilibrio térmico* y su temperatura media permanecerá constante. Si la Tierra refleja o radia menos energía que la que recibe, su temperatura aumentará. Si refleja o radia más de la que recibe, su temperatura disminuirá.

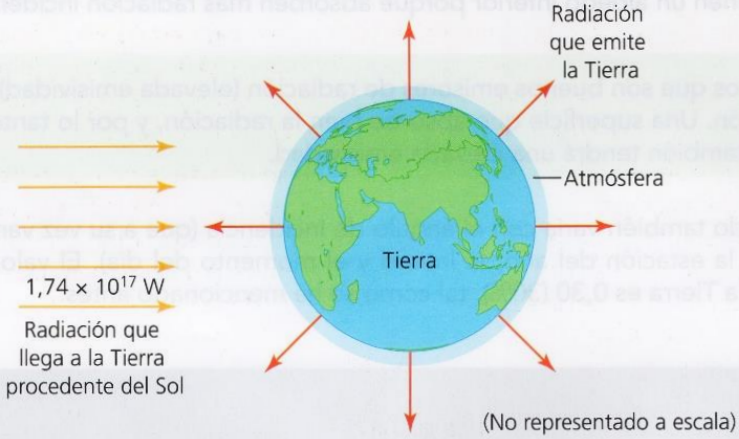


Figura 8.56
La radiación que recibe y emite la Tierra

El **efecto invernadero** es el nombre que se ha asignado al efecto *natural* que produce la atmósfera de un planeta, y que consiste en aumentar la temperatura de dicho planeta por encima del valor que le correspondería si no tuviera atmósfera.

La Tierra ha experimentado un efecto invernadero *beneficioso* durante todo el tiempo que ha tenido atmósfera; si nuestro planeta no tuviera atmósfera, su temperatura sería 30 °C menor y no habría vida. La Luna y la Tierra están aproximadamente a la misma distancia del Sol, pero la temperatura de la superficie de la Tierra es mayor porque tiene atmósfera.

No obstante, la mayoría de los científicos consideran actualmente que el efecto invernadero se ha *intensificado* (aumentado). Se cree que se debe principalmente a que la actividad humana ha modificado la composición de la atmósfera. El aumento del efecto invernadero se tratará más tarde en este capítulo.

Si la Tierra *no* tuviera atmósfera, la intensidad media de la radiación solar que recibe el total de la superficie terrestre (durante un periodo de tiempo prolongado) se podría calcular del siguiente modo:

$$I = \frac{\text{potencia total que recibe la Tierra del Sol}}{\text{área total de la superficie terrestre}} = \frac{1\,361 \times \pi r_T^2}{4\pi r_T^2}$$

donde r_T es el radio de la Tierra, $6{,}37 \times 10^6$ m.

$$I = 340\,\text{W m}^{-2}$$

Pero la Tierra *tiene* una atmósfera. De los 340 W m^{-2} que inciden sobre la Tierra y su atmósfera, 107 W m^{-2} se vuelven a reflejar inmediatamente al espacio (unos 77 W m^{-2} procedentes de la atmósfera y 30 W m^{-2} de la superficie de la Tierra). Con estos valores, se puede calcular el albedo de la Tierra, 107/340 ≈ 30%, que concuerda con la cifra indicada antes para el albedo medio de la Tierra.

Esto da como resultado una intensidad media global de 233 W m^{-2}, que es la que absorbe la Tierra y la atmósfera. En la Figura 8.57 se muestra lo que sucede con esta energía: la atmósfera absorbe 66 W m^{-2} y la superficie terrestre 167 W m^{-2}. (Aunque aquí se indican los valores actuales, las cifras pueden variar ligeramente según las fuentes de información que se usen; no es necesario aprenderlos).

Para que la Tierra mantenga su equilibrio térmico, es necesario que la intensidad incidente, 233 W m^{-2}, coincida con la intensidad que se irradia de nuevo al espacio.

La radiación es el único fenómeno que permite que la energía térmica pueda salir de la Tierra a través del espacio. (Sin embargo, la energía térmica también se transfiere de la superficie de la Tierra a la atmósfera mediante otros procesos, que incluyen la conducción, la convección y la evaporación).

La atmósfera absorbe un porcentaje mucho mayor de esta energía radiante saliente que de la energía radiante que entra procedente del Sol. Esto se debe a que la temperatura terrestre es muy inferior a la temperatura solar, por lo que la radiación que emite está en su mayor parte a menores longitudes de onda (todas en el espectro infrarrojo en lugar de en el visible). Véase la Figura 8.52. Los gases (de efecto invernadero) que hay en la atmósfera absorben parte de estas longitudes de onda del infrarrojo, pero no absorben tanta radiación entrante.

La energía que absorbe la atmósfera también se transfiere como energía radiada, que se emite en todas las direcciones, incluso directamente al espacio. Sin embargo, la mayor parte de la energía se vuelve a transferir a la superficie de la Tierra (mediante radiación y otros procesos), por lo que el proceso continúa y se establece el equilibrio térmico a una determinada temperatura. (De media actualmente son 15 °C en la superficie de la Tierra). En la Figura 8.57 hemos intentado simplificar y resumir estos procesos complejos.

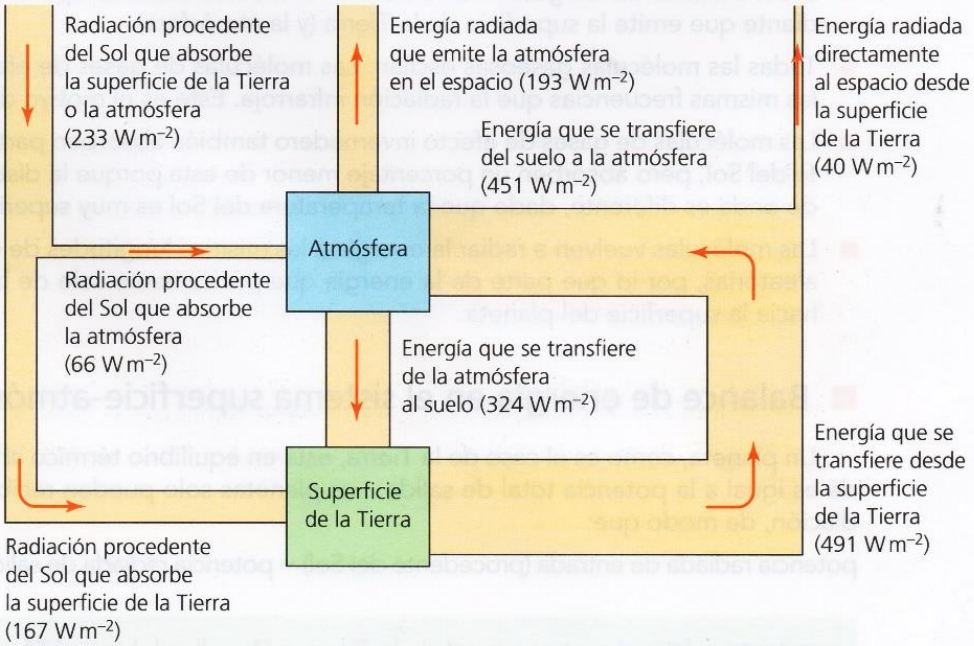


Figura 8.57 *Flujo de energía en la atmósfera de la Tierra*

Gases de efecto invernadero

La atmósfera de la Tierra se ha formado a lo largo de millones de años mediante procesos volcánicos y biológicos naturales, y a partir de colisiones con cometas y asteroides. El aire de la atmósfera contiene aproximadamente (por volumen) 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y 0,9% de argón. También contiene trazas naturales de otros gases, incluido el dióxido de carbono y el vapor de agua. Algunas de estas trazas de gases se denominan **gases de efecto invernadero** porque desempeñan un papel destacado en el control de la temperatura terrestre y en el efecto invernadero. Estos gases absorben (y luego vuelven a emitir) la radiación infrarroja. El nitrógeno, el oxígeno y el argón no producen efecto invernadero (porque sus moléculas son no polares).

Hay muchos gases de efecto invernadero, pero los cuatro más importantes, por orden descendente de su contribución al efecto invernadero, son:

- el vapor de agua
- el dióxido de carbono
- el metano
- el óxido nitroso (monóxido de dinitrógeno).

La importancia relativa de estos gases a la hora de provocar el efecto invernadero depende de su abundancia relativa en la atmósfera, además de su capacidad para absorber la radiación infrarroja. Estos gases se pueden originar de forma natural o pueden ser generados por el ser humano.

El vapor de agua es con mucha diferencia el más abundante de los gases de efecto invernadero. De entre todos los demás, el dióxido de carbono contribuye entre el 15 y el 20% al efecto invernadero global.

El metano y el óxido nitroso absorben la radiación infrarroja con mayor intensidad que el dióxido de carbono, pero sus concentraciones en la atmósfera son muy inferiores.

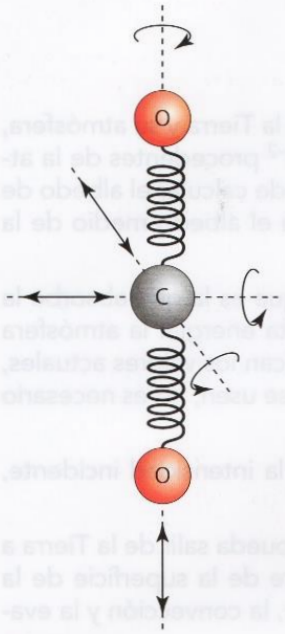


Figura 8.58
Algunas posibles vibraciones moleculares del dióxido de carbono

Las moléculas de los gases de efecto invernadero absorben la radiación infrarroja porque los átomos de sus moléculas no están en reposo: oscilan siguiendo un movimiento armónico simple, como si fueran masas conectadas por muelles. En la Figura 8.58 se representa un ejemplo muy simplificado de los posibles modos de vibración de una molécula de dióxido de carbono.

Si los átomos de una molécula oscilan a la misma frecuencia que la radiación que atraviesa el gas de efecto invernadero, entonces la energía se puede absorber (un ejemplo de un efecto conocido como *resonancia*), y la molécula se eleva a un nivel de energía vibratoria superior. La energía se vuelve a liberar rápidamente, aunque se emite en direcciones aleatorias.

El comportamiento de los gases de efecto invernadero es también un tema destacado en química.

Resumen del efecto invernadero

- Las moléculas de los gases «de efecto invernadero» absorben parte de la energía infrarroja radiante que emite la superficie de la Tierra (y la atmósfera).
- Todas las moléculas gaseosas oscilan. Las moléculas de gases de efecto invernadero oscilan a las mismas frecuencias que la radiación infrarroja. Este es el motivo de que absorban energía.
- Las moléculas de gases de efecto invernadero también absorben parte de la energía procedente del Sol, pero absorben un porcentaje menor de esta porque la distribución de las longitudes de onda es diferente, dado que la temperatura del Sol es muy superior a la de la Tierra.
- Las moléculas vuelven a radiar la energía a las mismas longitudes de onda, pero en direcciones aleatorias, por lo que parte de la energía que previamente sale de la Tierra se vuelve a dirigir hacia la superficie del planeta.

Balance de energía en el sistema superficie-atmósfera terrestre

Un planeta, como es el caso de la Tierra, está en equilibrio térmico *si* la potencia total de entrada es igual a la potencia total de salida. Los planetas solo pueden recibir o emitir energía por radiación, de modo que:

potencia radiada de entrada (procedente del Sol) = potencia radiada de salida (procedente de la Tierra)

constante solar × área transversal de la Tierra × (1 – albedo) = $e\sigma AT^4$

Para la Tierra y su atmósfera, tal como hemos visto, la constante solar es 1 361 W m^{-2}, el valor medio del albedo es 0,30 y la emisividad media es 0,61, por lo tanto:

$$1\,361 \times \pi\, r_T^2 \times (1 - 0{,}30) = 0{,}61 \times (5{,}67 \times 10^{-8}) \times 4\,\pi\, r_T^2 \times T^4$$

Este cálculo confirma que la temperatura media de la superficie es de unos 288 K (290 K).

Aunque en este cálculo se haya utilizado un modelo muy simplificado del balance energético de la Tierra, se puede usar para predecir el efecto del cambio de la emisividad y/o el albedo.

71 Vuelve al calcular la temperatura de la Tierra (según acabamos de hacer) asumiendo que el albedo aumenta un 10% y la emisividad desciende un 10%.

72 El planeta Urano está a una distancia media del Sol de $2{,}9 \times 10^{12}$ m.
- **a** Calcula la constante solar del planeta.
- **b** Estima la temperatura de su superficie si asumimos que los valores de su albedo y emisividad son los mismos que los de la Tierra.
- **c** Averigua el verdadero valor de la temperatura de la superficie de Urano.

73 Imagina que se ha descubierto un planeta nuevo que orbita alrededor de una estrella lejana con un radio medio de $2{,}7 \times 10^{12}$ m.
- **a** Si la potencia que emite la estrella es $1{,}3 \times 10^{28}$ W, estima la temperatura de la superficie de la estrella. ¿Qué hipótesis has asumido?
- **b** ¿Crees que puede haber vida en este planeta?

74 Explica por qué un planeta de radio $2r$ tendría aproximadamente la misma temperatura que un planeta de radio r si ambos están a la misma distancia de una estrella (asume valores iguales del albedo y de la emisividad).

Calentamiento global y cambio climático

La temperatura terrestre ha ido cambiando a lo largo del tiempo, pero los incrementos en los últimos 100 años parecen ser relativamente repentinos. En la Figura 8.59 se muestran los datos que representan temperaturas medias globales durante los últimos 130 años. Aunque ha habido algunas dudas sobre la exactitud de esta información (especialmente los datos más antiguos), lo científicos generalmente convienen que el planeta se está calentando, que la temperatura media ha subido unos 0,7 °C (±0,2 °C) entre 1905 y 2005, y que el aumento de la temperatura durante el siglo XXI será mayor. Desde 2004 hasta 2013 no ha habido un cambio significativo en la temperatura media global (ya elevada), pero el periodo de tiempo es demasiado corto para extraer una conclusión de estos datos.

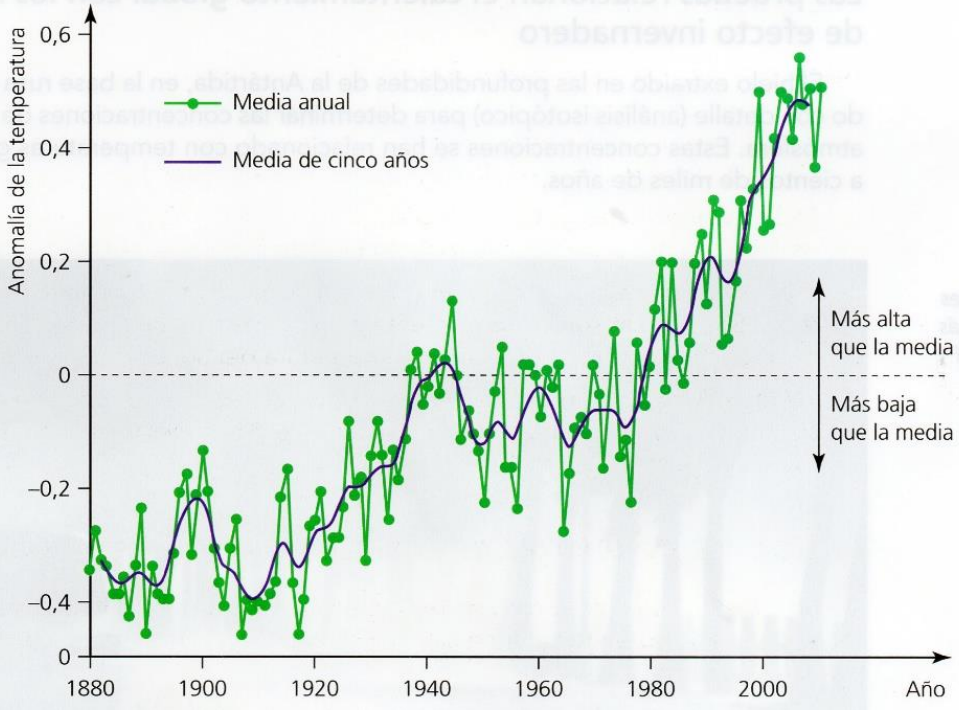


Figura 8.59 *Cambios en las temperaturas globales. La anomalía de temperatura es la diferencia entre las temperaturas medidas y la media a largo plazo*



Figura 8.60
Las Maldivas es un país situado prácticamente a nivel de mar y amenazado por el aumento del nivel de los océanos

Casi todos los científicos están de acuerdo actualmente en que el motivo de los incrementos de las temperaturas globales es el **efecto invernadero intensificado**, debido al aumento de la concentración de los gases que lo provocan (especialmente el dióxido de carbono) que generan las actividades humanas. Así se reduce la intensidad de la radiación que emite la Tierra. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) ha concluido que los incrementos en la temperatura global se «deben muy probablemente a un aumento observado de la concentración de gases de efecto invernadero antropogénicos». («Antropogénico» significa provocado por el ser humano). Esto supone que el aumento de la combustión de los combustibles de origen fósil ha liberado dióxido de carbono adicional a la atmósfera y es con toda probabilidad la mayor causa del calentamiento global actual.

Las dos consecuencias principales del calentamiento global son el *cambio climático* y el *aumento del nivel del mar*, pero también hay muchos otros factores interconectados, y entre ellos se incluyen los siguientes:

- La nieve y el hielo tienen un albedo muy elevado; el calentamiento global provocará que disminuya la cantidad de nieve y de hielo que cubren la superficie terrestre, por lo que el albedo medio del planeta disminuirá y aumentará la absorción de la radiación solar en esos lugares.
- Si las temperaturas de los océanos aumentan, se reducirá la cantidad de dióxido de carbono que se disuelve en el agua (la solubilidad del dióxido de carbono disminuye cuando aumenta la temperatura), por lo que se liberará más gas a la atmósfera y se incrementará el efecto invernadero.
- Los cambios en la explotación del suelo afectan a la concentración de los gases de efecto invernadero, en especial a la del dióxido de carbono. Los árboles y el resto de las plantas absorben dióxido de carbono del aire durante la fotosíntesis. Este es un ejemplo de *fijación de carbono*: la eliminación del dióxido de carbono del aire y la formación de compuestos de carbono sólidos. Cualquier cambio generalizado en la explotación del suelo (en particular la deforestación) puede conllevar un aumento de la concentración atmosférica de dióxido de carbono. Estos cambios también pueden provocar modificaciones en el albedo y, si el terreno se quema para deforestarlo y darle otro uso, se libera más dióxido de carbono en el proceso.

Las pruebas relacionan el calentamiento global con los niveles de gases de efecto invernadero

El hielo extraído en las profundidades de la Antártida, en la base rusa de Vostok, se ha estudiado con detalle (análisis isotópico) para determinar las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera. Estas concentraciones se han relacionado con temperaturas globales que se remontan a cientos de miles de años.

Figura 8.61
¿Tienen los huracanes (tifones) cada vez más intensidad debido al cambio climático?



Los resultados se representan en la Figura 8.62 y parece evidente que existe una *correlación* definida entre las temperaturas medias globales y la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera. Sin embargo, esto en sí no demuestra que los cambios en los niveles de dióxido de carbono hayan *provocado* los cambios de temperatura.

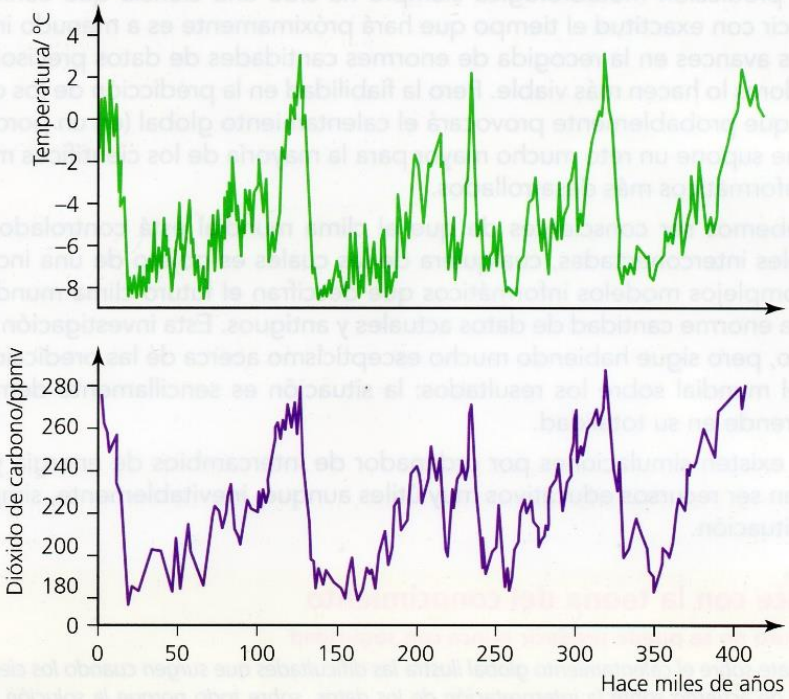


Figura 8.62
Existe una correlación entre las temperaturas medias globales y la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera (ppmv = partes por millón por volumen)

Más recientemente, y en un intervalo de tiempo mucho menor, se han detectado incrementos significativos en las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera en cierto momento del calentamiento global, tal como se indica de forma aproximada en la Figura 8.63.

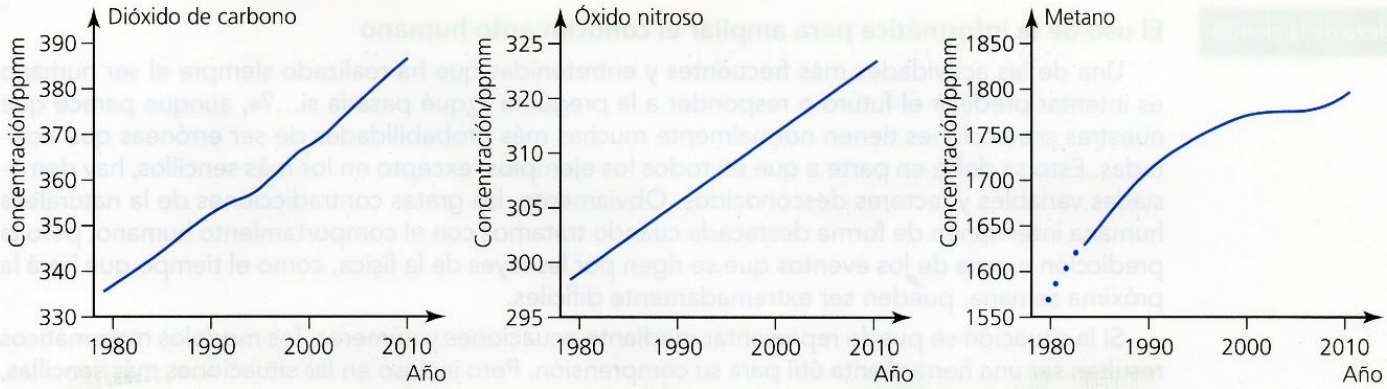


Figura 8.63
El aumento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero en los últimos años (ppmm = partes por mil millones)

Enlace con la teoría del conocimiento

Correlación y causa

La **correlación** (relación) entre el incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero y el aumento de las temperaturas globales está ya probada y reconocida (casi) de forma generalizada. No obstante, esto no significa que podemos estar seguros de que el calentamiento global está provocado por la emisión de una mayor concentración de gases de efecto invernadero. Obviamente, no se pueden llevar a cabo experimentos controlados para comprobar esta teoría y debemos confiar en los datos estadísticos limitados, los modelos informáticos y el razonamiento científico. En este caso no es posible lograr una certeza del 100%, por lo que los individuos y la sociedad deben emitir juicios con criterio basados en la mejor evidencia científica posible. Desde luego, algunas personas siempre decidirán no estar de acuerdo, o ignorar, las opiniones de la mayoría.

Naturaleza de la ciencia

Modelos simples y complejos del comportamiento de los sistemas gaseosos

La teoría cinética de los gases es un modelo matemático relativamente sencillo que predice de forma exacta el comportamiento de la mayoría de los gases que están confinados en espacios reducidos. La atmósfera terrestre también es un sistema gaseoso, pero su tamaño y complejidad desafían los modelos matemáticos a escala.

La predicción meteorológica siempre ha sido una ciencia que conlleva ciertas dificultades y predecir con exactitud el tiempo que hará próximamente es a menudo imposible, aunque los modernos avances en la recogida de enormes cantidades de datos precisos y el uso de potentes ordenadores lo hacen más viable. Pero la fiabilidad en la predicción de los cambios climáticos a largo plazo que probablemente provocará el calentamiento global (en un porcentaje incierto) es una tarea que supone un reto mucho mayor para la mayoría de los científicos más brillantes y los programas informáticos más desarrollados.



Debemos ser conscientes de que el clima mundial está controlado por un gran número de variables interconectadas, cualquiera de las cuales es objeto de una incertidumbre considerable. Los complejos modelos informáticos que descifran el futuro clima mundial se han creado a partir de una enorme cantidad de datos actuales y antiguos. Esta investigación sigue en curso en todo el mundo, pero sigue habiendo mucho escepticismo acerca de las predicciones, y no hay un acuerdo a nivel mundial sobre los resultados: la situación es sencillamente demasiado compleja y no se comprende en su totalidad.



Ya existen simulaciones por ordenador de intercambios de energía y modelos climáticos que pueden ser recursos educativos muy útiles aunque, inevitablemente, simplifican considerablemente la situación.

Enlace con la teoría del conocimiento

El futuro no se puede predecir nunca con seguridad

El debate sobre el calentamiento global ilustra las dificultades que surgen cuando los científicos no siempre se pueden poner de acuerdo sobre la interpretación de los datos, sobre todo porque la solución implica una actuación a gran escala y la cooperación internacional de los gobiernos. Pero cuando los científicos no logran llegar a un acuerdo, ¿cómo decidimos entre las distintas teorías?

No puede haber certeza, o acuerdo, en la predicción de eventos tan complejos como el clima futuro, por lo que los gobiernos y las organizaciones deben tomar decisiones cruciales a largo plazo que nos afectan a todos. En cualquier caso, ¿deben planificar para lo peor que pueda suceder, porque de lo contrario sería irresponsable por su parte, o deben buscar cierto consenso entre la mayoría de científicos?

Naturaleza de la ciencia

El uso de la informática para ampliar el conocimiento humano

Una de las actividades más frecuentes y entretenidas que ha realizado siempre el ser humano es intentar predecir el futuro o responder a la pregunta «¿qué pasaría si...?», aunque parece que nuestras predicciones tienen normalmente muchas más probabilidades de ser erróneas que acertadas. Esto se debe en parte a que en todos los ejemplos, excepto en los más sencillos, hay demasiadas variables y factores desconocidos. Obviamente, las gratas contradicciones de la naturaleza humana intervienen de forma destacada cuando tratamos con el comportamiento humano, pero la predicción exacta de los eventos que se rigen por las leyes de la física, como el tiempo que hará la próxima semana, pueden ser extremadamente difíciles.

Si la situación se puede representar mediante ecuaciones y números, los modelos matemáticos resultan ser una herramienta útil para su comprensión. Pero incluso en las situaciones más sencillas, casi siempre hay simplificaciones y suposiciones que generan incertidumbre en las predicciones. Cuando se trata de situaciones complejas, como las predicciones meteorológicas del próximo mes, el valor de una acción durante todo un año o el clima dentro de 50 años, incluso las personas más capacitadas del mundo tendrán que enfrentarse a la complejidad y el volumen de los datos disponibles. El rápido aumento de la capacidad de cálculo de los ordenadores durante los últimos años ha modificado esta situación.

Los ordenadores modernos tienen una capacidad de cálculo y una memoria que aventaja en gran medida a los seres humanos. Pueden gestionar grandes cantidades de datos y realizar numerosos cálculos a los que sería imposible acceder si no existieran. Son la solución ideal para realizar predicciones sobre el clima en el futuro, pero eso no implica necesariamente que las predicciones sean correctas. Las previsiones realizadas con medios informáticos están limitadas por la introducción de datos que se realice y, más concretamente, por las tareas específicas que el ser humano solicite a las máquinas que se lleven a cabo. Para comprobar la exactitud de las predicciones, los modelos informáticos se pueden utilizar para crear modelos de antiguas situaciones complejas conocidas con el fin de poder anticipar lo que pasará en el futuro. Aunque predecir el pasado es siempre mucho más fácil que predecir el futuro.

75 Usa los datos de la Figura 8.63 para calcular en qué porcentaje han aumentado las concentraciones en la atmósfera de los tres gases de efecto invernadero entre 1980 y 2010.

76 **a** Estima el aumento de energía que se necesita para incrementar en 1 °C la temperatura media de los océanos del planeta.
b ¿Cuánto tiempo tarda el Sol en radiar esa cantidad de energía a la Tierra?

77 **a** El calor latente específico de vaporización del agua es $2{,}26 \times 10^6$ J kg^{-1}. Explica cuál es su significado.
b Usa esta cifra para calcular la energía térmica que se debe suministrar al agua de la superficie de un océano para que se evapore y forme una nube de 500 000 kg.
c Si la nube se encuentra a una altura de 5 km sobre el océano, compara la respuesta que has obtenido en el apartado **b** con la energía potencial gravitatoria que también ha adquirido el agua de la nube.
d Asumiendo que la energía térmica para la evaporación procede de la radiación solar y se ha liberado a una tasa de 25 W m^{-2} sobre una superficie de 10 km^2, ¿cuánto tiempo ha tardado el agua de la nube en evaporarse del océano (redondea la respuesta a la hora más cercana)?

78 Busca información en Internet sobre la capa de hielo de la Antártida occidental y sobre el motivo por el que algunos científicos han manifestado su preocupación al respecto.

79 Investiga sobre los orígenes y usos del gas SF_6, que es posiblemente el más potente de todos los gases de efecto invernadero.

80 Busca información sobre:
a los motivos exactos por los que el aumento de las temperaturas globales provoca un aumento del nivel del mar
b cuánto han variado los niveles medios del mar en los últimos:
i 100 años
ii 10 años.

Durante los últimos años se han tomado muchas medidas para combatir los efectos del calentamiento global, pero ¿son suficientes? Dado que el cambio climático es uno de los mayores problemas a los que se ha enfrentado el mundo en muchos años, es posible que nos familiaricemos demasiado con el problema y lo aceptemos, y que por ello muchas personas no se tomen suficientemente en serio las consecuencias.

Sin embargo, muchos científicos están convencidos de que ahora debemos tomar más medidas. En abril de 2014 el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) publicó un informe en el que se describían los efectos del cambio climático como «graves, generalizados e irreversibles». Se ha confirmado que la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera es el factor dominante que conduce al cambio climático, y quizá la única recomendación destacada (en los informes detallados) ha sido realizar el cambio de los combustibles de origen fósil basados en el carbón a las fuentes de energía renovables (y quizá la energía nuclear) «cuanto antes». Se ha previsto que los costes económicos globales que supone el retraso en tomar esta medida, y el hecho de tener que afrontar las consecuencias del cambio climático en el futuro serán mayores que el coste económico de una acción generalizada a corto plazo. Estos cambios tan drásticos no podrán realizarse sin la intervención y el liderazgo de los gobiernos, así como de acuerdos internacionales significativos, en mayor medida de lo que ha sido evidente en los últimos años.

A pesar de la aparente inevitabilidad del incremento del calentamiento global y del cambio climático, el informe de 2014 resulta esperanzador, ya que afirma que la solución de problemas ofrece desafíos a los que se puede hacer frente y oportunidades para construir otro tipo de futuro para nuestro planeta.

Perspectivas adicionales

Reducción del calentamiento global

La reducción del calentamiento global se ha convertido en un importante desafío a nivel mundial y mucha gente opina que se trata del problema más grave al que se enfrenta el mundo actual. Recibe una gran atención por parte de los medios de comunicación y se están llevando a cabo esfuerzos considerables en todos los niveles sociales para intentar resolver los problemas.

Sin embargo, el incremento de la demanda energética en los países en desarrollo y el aumento continuado de la población mundial se traduce en una demanda de energía eléctrica (y de la necesidad de quemar combustibles de origen fósil) cada vez mayor. Mucha gente cree también que existe un conflicto fundamental entre la necesidad de reducir las demandas de energía y el estilo de vida moderno en los países desarrollados, orientado al consumo.

Aunque la mayoría de los científicos mejor informados cree firmemente en el efecto invernadero intensificado, es imposible corroborarlo al 100%, por lo que queda cierta duda y hay un número significativo de personas que prefieren creer, por diversas razones, que el problema se ha exagerado (o incluso que los científicos están equivocados). Dada la enorme cantidad de información y desinformación a la que podemos tener acceso sobre este tema, las personas y las organizaciones pueden seleccionar los datos que crean convenientes para defender sus propios puntos de vista o intereses.

Soluciones posibles

- Estimular a las organizaciones y las personas a que reduzcan sus necesidades energéticas. No es fácil conseguir que las personas modifiquen sus hábitos, y cualquier gobierno que intente imponer considerables aumentos de precio o leyes nuevas para reducir el consumo de energía sería muy impopular. Según ciertas opiniones, la sociedad debería tender (especialmente en los países desarrollados) a usar menos automóviles y de tamaño más pequeño, a un transporte público mejor y más eficiente energéticamente, a viajar menos (tanto por trabajo como por placer), a reducir el uso de sistemas de calefacción o de aire acondicionado, y en general a una vida de austeridad, en lugar de inclinarnos por el consumismo y los excesos. La reducción de las necesidades de energía transferida a partir de la quema de combustibles de origen fósil por parte de personas y organizaciones se conoce como la reducción de su *huella de carbono*.
- Desarrollar e incrementar considerablemente el uso de los recursos procedentes de energías renovables y de la energía nuclear.
- Fijar e imponer límites y controles estrictos en las emisiones de gases de efecto invernadero, como los que imponen los acuerdos internacionales (por ejemplo, el Protocolo de Kyoto). Los países (o las grandes empresas) no tendrían otra opción que la de respetar los límites totales aceptados, aunque puede que no sea justo o razonable fijar los mismos límites para los distintos países. Para estimular la iniciativa y la flexibilidad dentro de estos límites, se puede introducir el *comercio de carbono* (también conocido como «límites máximos e intercambios comerciales»), de modo que un país o una empresa pueda exceder su límite comprando el derecho a más emisiones a otros países o empresas. También se puede alentar a la población y las organizaciones a alcanzar la *neutralidad de carbono*, de tal forma que las acciones que provocan la emisión de gases de efecto invernadero se compensen con otras acciones que son beneficiosas para el medio ambiente, por ejemplo la plantación de árboles.
- Usar la última tecnología para conseguir la máxima eficiencia posible de las centrales eléctricas. Esto puede implicar el cierre de antiguas centrales y el uso de gas natural siempre que sea posible, ya que es más eficiente y crea menos emisiones que el carbón o el gasóleo. Tal como hemos explicado, un porcentaje elevado e inevitable de la energía de entrada en una central eléctrica se transforma en energía térmica, que a menudo se transfiere al entorno. En los *sistemas combinados de calor y electricidad* (CHP por sus siglas en inglés) parte de la energía térmica se transfiere usando el agua caliente para suministrar calor a viviendas y oficinas. Helsinki, en Finlandia, es un buen ejemplo del uso extendido de esta idea (Figura 8.64).
- Fomentar el uso de vehículos eléctricos e *híbridos*. Los vehículos impulsados con gasolina son cómodos y potentes, pero su eficiencia es muy reducida y emiten gases de efecto invernadero a la atmósfera. Los vehículos eléctricos presentan numerosas ventajas: son silenciosos y no generan contaminación o gases de efecto invernadero cuando se utilizan. No obstante, también tienen inconvenientes:
  - La energía que utilizan se almacena en una batería, pero incluso las mejores baterías tienen mucha menos densidad de energía que el petróleo o la gasolina, lo que significa que, aun incorporando baterías de mayor tamaño, no es posible almacenar energía para realizar viajes largos, además del hecho de que añadir una batería grande supone añadir una masa considerable al automóvil.
  - Los coches eléctricos normalmente son menos potentes y tienen menos aceleración que los que funcionan con gasolina.
  - Las baterías tardan horas en recargarse.
  - La energía eléctrica que se usa para cargar la batería se genera en una central eléctrica (probablemente quemando carburante de origen fósil) que luego se transporta al lugar en el que se carga el vehículo.

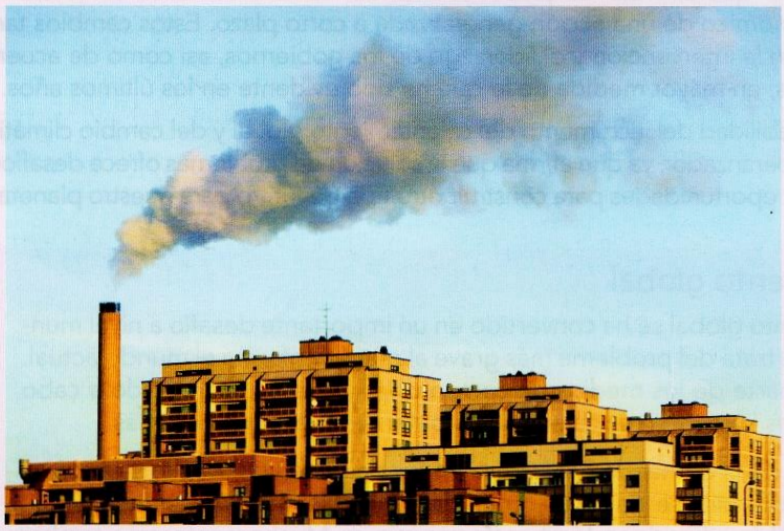


Figura 8.64
Las viviendas de la población local se calientan con la energía térmica procedente de esta central de Helsinki

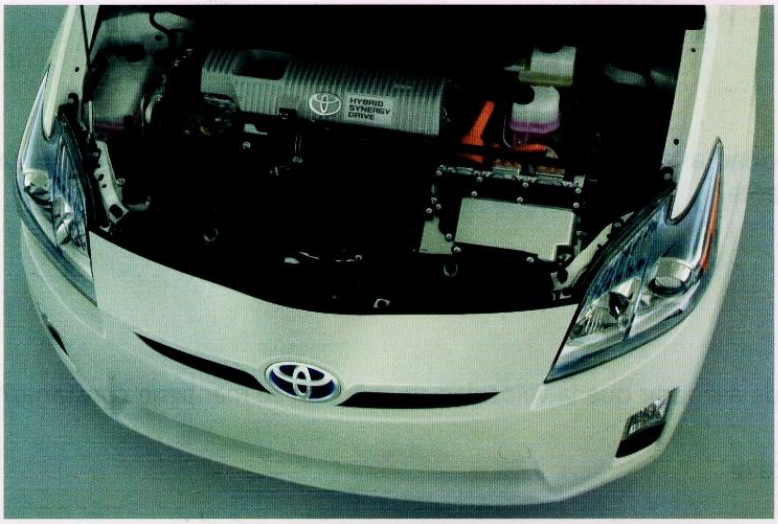


Figura 8.65
Un vehículo híbrido

Las ventajas que supone la eficiencia de la energía global y las menores emisiones de gases de efecto invernadero de los vehículos eléctricos quizá solo superen ligeramente a las del uso de motores de gasolina, especialmente si se tiene en cuenta la fabricación de los vehículos y las baterías.

Los vehículos híbridos (Figura 8.65) se han desarrollado para superar los inconvenientes tanto de los vehículos eléctricos como los que funcionan con gasolina, y para combinar al mismo tiempo sus ventajas. En un vehículo híbrido, un motor eléctrico suministra la energía de forma eficiente para conducir a una velocidad menor, y se usa un motor de combustión interna a su máxima eficiencia si se necesita una mayor potencia para lograr velocidades y aceleraciones mayores. El uso de sistemas de frenado de recuperación de energía supone que si se usan frenos para reducir la velocidad de un vehículo, la energía cinética se transfiere en energía química en el interior de la batería mediante un generador (en lugar de transferirse en forma de energía térmica a los frenos, los neumáticos y la carretera). Todo el sistema está controlado por un ordenador y el vehículo tiene una masa menor que el convencional de gasolina.

- La *captura* y el *almacenamiento* de *carbono*. La «captura de carbono» es el término que se usa para eliminar el dióxido de carbono de los gases que se liberan cuando se queman combustibles de origen fósil en las centrales eléctricas. Existen varios métodos efectivos, pero reducen considerablemente la eficiencia de la central eléctrica, por lo que se debe quemar más combustible para producir la misma potencia de salida y esto supondría un notable incremento de los precios de la electricidad. El dióxido de carbono extraído se debe almacenar de forma permanente (proceso que también se conoce como *secuestro*), y para ello existen diversas posibilidades, incluido el almacenamiento como gas o en forma de carbonatos. Si se incrementa el área de la Tierra que está cubierta por árboles y otras plantas (y se detiene la deforestación), el material vegetal captura el carbono, y se trata de otra forma atractiva de eliminar más dióxido de carbono de la atmósfera mediante la fotosíntesis.

1 **a** ¿Crees que a la mayoría de las personas que conoces les parece bien modificar sus hábitos en un esfuerzo por reducir el calentamiento global?

b Si la respuesta es afirmativa, explica cómo. Si es negativa, argumenta por qué.

2 Los vehículos híbridos son significativamente más caros que los vehículos convencionales de gasolina, por lo que sus ventas son reducidas. Explica por qué algunas personas siguen estando dispuestas a pagar más dinero por los vehículos híbridos.

3 Busca en Internet información reciente sobre el secuestro de carbono.

4 Encuentra un sitio en Internet que te permita calcular la huella de carbono de tu estilo de vida.

Selección de preguntas de examen

Hoja 1 Preguntas del IB y preguntas tipo IB

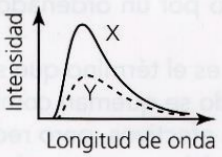
1 ¿Cuál de las siguientes opciones no afecta a la velocidad a la que se transfiere radiación electromagnética desde un objeto caliente que se mantiene a temperatura constante?

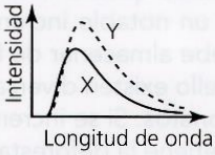
A. el material del que está fabricado
B. la temperatura de la superficie
C. el área de la superficie
D. la emisividad de la superficie.

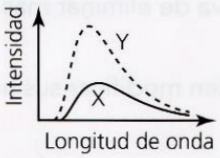
2 ¿Qué partes de un reactor nuclear son responsables de asegurar que la velocidad de reacción se mantiene constante?

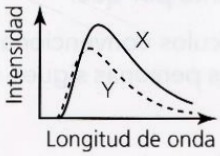
A. el intercambiador de calor y las barras de control
B. las barras de combustible y el intercambiador de calor
C. las barras de combustible y el moderador
D. el moderador y las barras de control.

3 Dos cuerpos negros X e Y están a diferentes temperaturas. La temperatura del cuerpo Y es superior a la del cuerpo X. ¿Cuál de las siguientes gráficas representa los espectros de cuerpo negro de los dos cuerpos?

A.


B.


C.


D.


© IB Organization

4 La potencia de salida de un aerogenerador es de 64 kW cuando la velocidad del viento es 8 m s^{-1}. Si la velocidad del viento disminuye a 4 m s^{-1}, ¿cuál de los siguientes valores representa la mejor estimación de la potencia de salida reducida?

A. 32 kW
B. 16 kW
C. 8 kW
D. 4 kW

5 El plutonio-239 se genera en las centrales eléctricas que usan uranio como combustible. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones sobre este proceso es correcta?

A. El plutonio es fisible y se puede usar como combustible nuclear.
B. El plutonio se genera en la fisión nuclear.
C. El plutonio se crea en el moderador.
D. El plutonio no experimenta desintegración radiactiva.

6 Un planeta con una temperatura superficial de 30 °C radia potencia a una tasa *P* por metro cuadrado. Otro planeta tiene un área de superficie similar y su temperatura es de 90 °C. ¿Cuál de estos valores representa la mejor estimación de la potencia radiada por metro cuadrado del segundo planeta?

A. 1,2*P*
B. 2*P*
C. 3*P*
D. 9*P*

7 ¿Cuál es el significado correcto del enriquecimiento de uranio?

A. incremento del porcentaje de uranio-237 en el combustible
B. incremento del porcentaje de uranio-235 en el combustible
C. incremento de la densidad del combustible
D. incremento del porcentaje de plutonio en el combustible.

8 ¿Cuál de las siguientes opciones no se considera una ventaja del uso de la energía hidroeléctrica generada en el agua embalsada en lagos?

A. La fuente de energía es renovable.
B. No emite cantidades significativas de gases de efecto invernadero.
C. La generación de energía es más eficiente que en las centrales eléctricas que operan con combustibles de origen fósil.
D. El efecto sobre el medio ambiente es insignificante.

9 Si con el calentamiento global se reduce la cantidad de nieve y hielo en la superficie terrestre, ¿cómo afectará esta situación al albedo y la absorción de energía de la Tierra?

A. Tanto el albedo como la tasa de absorción de energía se incrementarán.
B. Tanto el albedo como la tasa de absorción de energía se reducirán.
C. El albedo se reducirá y la tasa de absorción de energía aumentará.
D. El albedo aumentará y la tasa de absorción de energía se reducirá.

10 ¿Cuál de estas opciones no es una manera posible de reducir la tasa de calentamiento global?

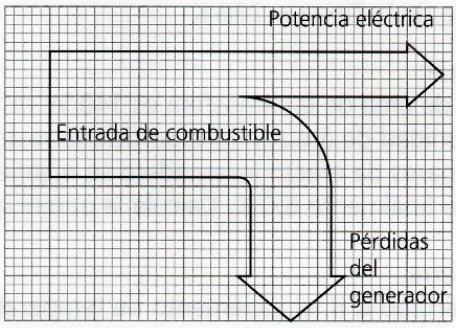
A. sustituir las centrales eléctricas que operan con carbón por las que funcionan con gas natural
B. aumentar el uso de la energía nuclear
C. usar vehículos híbridos
D. hacer funcionar las centrales eléctricas a temperaturas más bajas.

Hoja 2 Preguntas del IB y preguntas tipo IB

1 **a** Indica dos ejemplos de combustibles de origen fósil. (2)

b Explica por qué se dice que los combustibles de origen fósil no son renovables. (2)

c Este es un diagrama de Sankey para la generación de energía eléctrica mediante combustible de origen fósil como fuente de energía primaria.

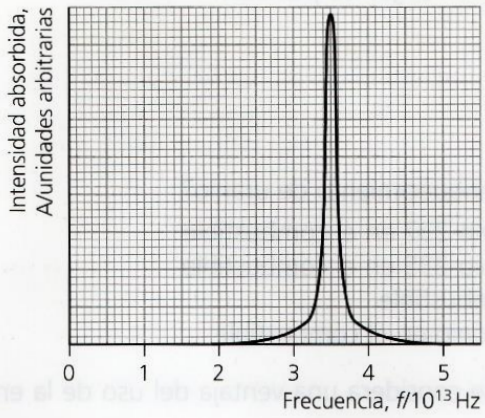


Usa el diagrama de Sankey para calcular la eficiencia de la producción de energía eléctrica y razona tu respuesta. (2)

d A pesar de que los combustibles fósiles son fuentes de energía no renovables y que contribuyen a la contaminación atmosférica, su uso está generalizado. Sugiere tres motivos de este uso tan extendido. (3)

© IB Organization

2 a En esta gráfica se muestra parte del espectro de absorción del óxido de nitrógeno (N_2O) y se representa la intensidad de la radiación absorbida *A* en función de la frecuencia *f*.

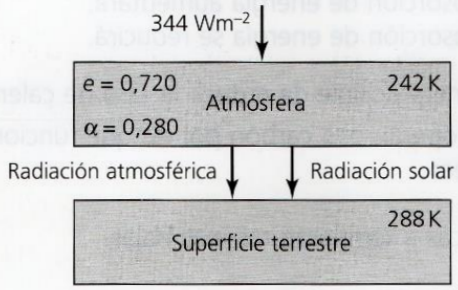


i. Indica la región del espectro electromagnético a la que pertenece la frecuencia de resonancia (valor máximo) del óxido de nitrógeno. (1)

ii. Usa la respuesta del apartado **a i** para explicar por qué el óxido de nitrógeno está clasificado como gas de efecto invernadero. (2)

b Define *emisividad* y *albedo*. (3)

c En el diagrama siguiente se representa un modelo climático de equilibrio energético simple en el que la atmósfera y la superficie terrestre son dos cuerpos que tienen una temperatura constante. La superficie terrestre recibe tanto la radiación solar como la radiación que emite la atmósfera. Puedes asumir que la superficie terrestre se comporta como un cuerpo negro.



Los datos del modelo son los siguientes:
temperatura media de la atmósfera terrestre = 242 K
emisividad, **e**, de la atmósfera terrestre = 0,720
albedo medio, α, de la atmósfera terrestre = 0,280
intensidad solar en la zona superior de la atmósfera = 344 W m^{-2}
temperatura media de la superficie de la Tierra = 288 K

Usa estos datos para demostrar que:

i. la potencia radiada por unidad de área de la atmósfera es 140 W m^{-2}. (2)

ii. la energía solar absorbida por unidad de área en la superficie terrestre es 248 W m^{-2}. (1)

d Se estima que, si la producción de gases de efecto invernadero se mantiene a su nivel actual, la temperatura de la atmósfera terrestre aumentará finalmente 6,0 K. Calcula la potencia por unidad de área que:

i. radiaría la atmósfera (1)

ii. absorbería la superficie de la Tierra. (1)

e Estima, usando la respuesta del apartado **d ii**, el incremento de temperatura en la superficie terrestre. (3)

© IB Organization

9 Fenómenos ondulatorios

IDEAS FUNDAMENTALES

- La solución del oscilador armónico se puede formular a partir de la variación de las energías cinética y potencial del sistema.
- La difracción por rendija simple tiene lugar cuando la onda incide sobre una rendija cuyo tamaño es aproximadamente el mismo que el de la longitud de onda incidente.
- Las interferencias producidas con rendijas múltiples y láminas delgadas dan lugar a patrones que se pueden repetir con exactitud.
- La resolución supone un límite absoluto a la separación de imágenes de objetos que puede alcanzar un sistema óptico u otro tipo de sistema.
- El efecto Doppler describe el fenómeno del desplazamiento de la longitud de onda/frecuencia cuando existe un movimiento relativo.

9.1 Movimiento armónico simple

La solución del oscilador armónico se puede formular a partir de la variación de las energías cinética y potencial del sistema

El movimiento armónico simple (MAS) se introdujo en el Capítulo 4, y ahora volveremos a tratar este importante concepto con mayor detalle matemático. Comenzaremos por examinar nuevamente dos osciladores simples, y a continuación explicaremos que el MAS y el movimiento circular presentan muchas similitudes matemáticas.

Ecuaciones de los periodos de dos osciladores simples de uso frecuente

El periodo, T, de un péndulo simple depende de su longitud, l (y del valor de la intensidad del campo gravitatorio, g):

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

El periodo, T, de una masa que oscila en el extremo de un muelle depende de la magnitud de la masa, m, y de la constante de fuerza, k, del muelle:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Ambas ecuaciones son puramente teóricas y para su obtención se han tenido en cuenta hipótesis simplificadoras sobre el sistema oscilatorio. No obstante, los experimentos de laboratorio y la representación gráfica adecuada de los resultados obtenidos, confirman que estas ecuaciones permiten llevar a cabo predicciones exactas de los periodos de estos osciladores.



En un laboratorio se puede investigar una amplia variedad de sistemas oscilatorios, muchos de los cuales presentan algunas similitudes con uno de los dos sistemas que acabamos de mencionar. Por ejemplo, existen muchos tipos de péndulos, entre los que se encuentran los que giran (*péndulos de torsión*). Los resultados se pueden representar gráficamente y se pueden evaluar para ver si el periodo del sistema y las variables que lo controlan están conectadas por una relación matemática simple. Un *diapasón* es un oscilador mecánico simple, que tiene una frecuencia dominante y la forma de onda que genera se puede analizar usando un micrófono conectado a un osciloscopio.

También existen muchas simulaciones de MAS por ordenador que permiten realizar manipulaciones rápidas de las variables para observar su efecto sobre el periodo.

Ejemplo resuelto

1 a A partir de los resultados del estudio de un péndulo simple, ¿qué gráfica dibujarías para obtener una recta que pasara por el origen?

b ¿Cómo determinarías un valor para la aceleración debida a la gravedad (intensidad del campo gravitatorio) a partir de la gráfica?

a $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$

$T = \frac{2\pi}{\sqrt{g}}\sqrt{l}$

Si comparamos esta expresión con la ecuación de una recta, $y = mx + c$, una gráfica en la que se representara T en función de $\sqrt{l}$ (o T^2 en función de l) tendría la forma de una recta que pasa por el origen.

b g se puede determinar a partir de la pendiente de la recta ($= 2\pi/\sqrt{g}$).

1 a Un péndulo simple completa 20 oscilaciones en 30,9 s. ¿Cuál es su longitud?

b Dibuja esquemáticamente el péndulo e indica claramente la longitud calculada en **a**.

2 a Se fija una masa de 200 g al extremo de un muelle largo y este se alarga 5,4 cm. ¿Cuál es la constante de fuerza del muelle?

b Si la masa se desplaza una pequeña distancia desde su posición de equilibrio y comienza a experimentar un MAS, calcula la frecuencia de las oscilaciones.

c Sugiere un posible motivo por el cual las oscilaciones con amplitudes grandes puede que no correspondan a un movimiento armónico simple.

3 a A partir de los resultados de un estudio sobre las oscilaciones de un sistema masa-muelle (con masa variable), ¿qué gráfica dibujarías para obtener una recta que pasara por el origen?

b ¿Cómo podrías determinar el valor de la constante de fuerza del muelle a partir de la gráfica?

Oscilaciones y movimiento circular

Existe una conexión muy estrecha entre las oscilaciones y el movimiento circular. En realidad, visto lateralmente, el patrón del movimiento circular y el de una oscilación simple son similares.

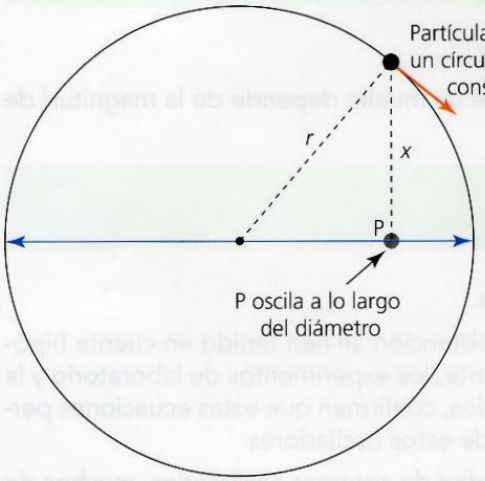


Figura 9.1
Comparación del movimiento circular con una oscilación

En la figura 9.1 se representa una partícula que se mueve describiendo un círculo a velocidad constante. El punto P es la proyección de la posición de la partícula sobre el diámetro del círculo.

Cuando la partícula se mueve describiendo un círculo, el punto P oscila hacia atrás y hacia delante a lo largo del diámetro con la misma frecuencia que la del movimiento circular de la partícula y con una amplitud equivalente al radio, r, del círculo.

Se puede considerar que una oscilación completa del punto P equivale al movimiento de la partícula a lo largo de un ángulo de 2π radianes (o 360°).

Si dibujamos una gráfica del desplazamiento perpendicular respecto al diámetro, x, en función del tiempo para el punto P, veremos que tiene exactamente el mismo aspecto que una gráfica de MAS (Figura 9.2) en la que la amplitud, x_0, es igual a r.

El concepto de *velocidad angular*, ω, se introdujo en el Capítulo 6 como una magnitud clave en la descripción matemática del movimiento circular y también se utiliza de forma generalizada en la descripción del MAS. Recordemos que, aunque se usan tanto los términos periodo como frecuencia y velocidad angular para describir una oscilación, son simplemente maneras distintas de representar la misma información:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

4 La reproducción de un video grabado a cámara lenta del movimiento de las alas de un pájaro permite calcular que ha estado aleteando arriba y abajo con una frecuencia de 22 Hz. ¿Cuál es el periodo de la oscilación y su velocidad angular?

5 Se determina que el motor de un coche gira a 4300 rpm (revoluciones por minuto). ¿Cuál es su velocidad angular?

6 La Tierra tarda 23 horas y 56 minutos en dar una vuelta completa sobre su propio eje.
a ¿Cuál es su velocidad angular?
b ¿Qué ángulo total recorre cuando gira durante 1 día (24 horas) 3 horas y 24 minutos?

7 Un objeto oscila con una velocidad angular de 48,1 rad s^{-1}. ¿Cuál es su periodo?

Ecuación que define el MAS

En el Capítulo 4 vimos que el movimiento armónico simple (MAS) se define como una oscilación en la que la aceleración, a, de un cuerpo es proporcional a su desplazamiento, x, desde su posición de equilibrio y en sentido contrario:

$$a \propto -x$$

Podemos reescribir esta ecuación como:

$$a = -\text{constante} \times x$$

La constante debe estar relacionada con la frecuencia porque la magnitud de la aceleración es mayor si la frecuencia es más elevada. Se puede demostrar que la constante es ω^2. Por tanto, la ecuación que define el MAS se puede escribir como:

$$a = -\omega^2 x$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física* y nos permite calcular la aceleración instantánea de un oscilador de frecuencia conocida para cualquier desplazamiento dado, tal como se muestra en el Ejemplo resuelto 2.

Ejemplo resuelto

2 Una masa oscila entre dos muelles con una frecuencia de 1,4 Hz.
a ¿Cuál es su velocidad angular?
b ¿Cuál es su aceleración cuando:
i su desplazamiento es 1,0 cm
ii su desplazamiento es 4,0 cm
iii atraviesa su posición de equilibrio?

a $\omega = 2\pi f = 2\pi(1{,}4) = 8{,}8\ \text{rad s}^{-1}$

b i $a = -\omega^2 x = -(8{,}8)^2 \times 0{,}010 = -0{,}77\ \text{m s}^{-2}$
ii $a = -\omega^2 x = -(8{,}8)^2 \times 0{,}040 = -3{,}1\ \text{m s}^{-2}$
iii $a = -\omega^2 x = -(8{,}8)^2 \times 0{,}0 = 0{,}0\ \text{m s}^{-2}$

8 El periodo de un péndulo es 2,34 s. ¿Cuánto se debe desplazar para que su aceleración sea de 1,00 m s^{-2}

9 Durante un MAS, una masa se mueve con una aceleración de 3,4 m s^{-2} cuando su desplazamiento es de 4,0 cm. Calcula:
a su velocidad angular
b su periodo.

10 Una masa que oscila en el extremo de un muelle completa exactamente 20 oscilaciones en 15,8 s.
a ¿Cuál es su aceleración cuando se desplaza 62,3 mm desde su posición de equilibrio?
b ¿Qué supuestos has tenido en cuenta?

Soluciones de la ecuación del MAS ($a = -\omega^2 x$)

Existen todavía muchos elementos de un oscilador que no podemos determinar directamente a partir de la ecuación que define el MAS, $a = -\omega^2 x$. Por ejemplo, ¿cuáles son los valores del desplazamiento y de la velocidad para un instante de tiempo determinado? Para responder a este tipo de preguntas necesitamos, o bien gráficas exactas, o bien otras «soluciones» matemáticas de la ecuación del MAS. (En este contexto, «soluciones» significa gráficas o ecuaciones que presentan la misma información de una forma más práctica).

Soluciones gráficas

En la Figura 9.2 se representa la forma de onda de un MAS que se inicia con desplazamiento cero en el instante $t = 0$. Para determinar el desplazamiento en cada instante de tiempo se puede utilizar una curva detallada como esta.

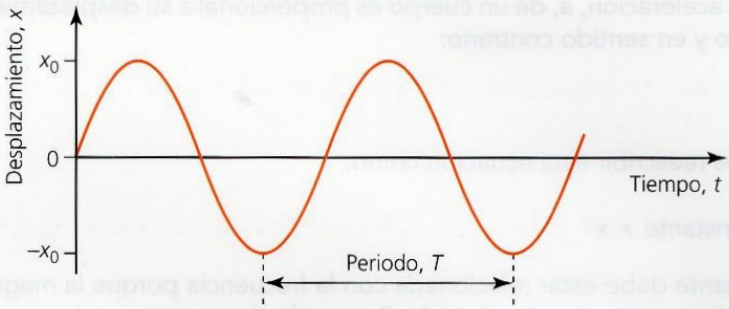


Figura 9.2 *Gráfica desplazamiento-tiempo para el MAS, representada mediante una onda seno; el tiempo empieza a contar cuando la partícula tiene desplazamiento cero*

La velocidad (o el desplazamiento) en un instante dado, se puede determinar a partir del gradiente de la curva desplazamiento-tiempo en ese punto (velocidad, v = cambio en el desplazamiento/cambio en el tiempo).

De forma análoga, la aceleración (o el desplazamiento) en un instante dado, se puede determinar a partir del gradiente de la gráfica de la velocidad (aceleración, $a = (\Delta v/\Delta t)$.

Por tanto, en teoría, los datos procedentes de la curva desplazamiento–tiempo se pueden procesar para calcular valores de la velocidad y de la aceleración, y se pueden representar las curvas correspondientes, como se muestra en la Figura 9.3. Las soluciones algebraicas a partir de ecuaciones trigonométricas para las curvas son normalmente más fáciles de obtener. Las ecuaciones que se representan en la Figura 9.3 se explican en el apartado siguiente.

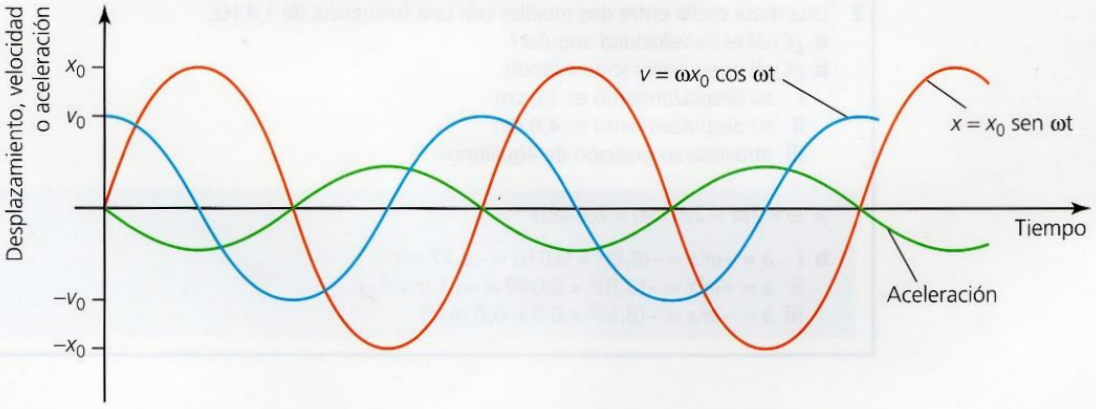


Figura 9.3 *Comparación entre el desplazamiento, la velocidad y la aceleración para un MAS. El conteo de tiempo se inicia en el instante de desplazamiento x = 0*

Las gráficas del desplazamiento y de la aceleración están desfasadas entre sí π y $\pi/2$ con respecto a la gráfica de la velocidad.

Iteración



Se pueden generar gráficas como las de la Figura 9.3 utilizando las leyes de la mecánica elemental (Capítulo 2) y partiendo de los principios fundamentales, pero puede ser un proceso tedioso. Si se conocen la masa, su posición y la fuerza asociada en un momento dado, es posible calcular lo que ocurrirá en el intervalo de tiempo siguiente, suponiendo que la fuerza *no* cambie. Pero, sin duda, a medida que la masa se mueve durante la oscilación, la fuerza sobre ella cambia. Sin embargo, si se escoge un intervalo de tiempo lo bastante breve, el cálculo puede seguir siendo exacto. Los resultados de cada cálculo se utilizan como datos de entrada del cálculo siguiente, y así sucesivamente. Este proceso se denomina **proceso iterativo**. Puede dar resultados muy exactos si los intervalos de tiempo son muy breves y se llevan a cabo un gran número de cálculos repetidos. ¡Son ideales para un ordenador!

Soluciones algebraicas

La curva desplazamiento – tiempo que se muestra en la Figura 9.2 tiene forma **sinusoidal** y se puede describir matemáticamente mediante una ecuación en la que aparece la función seno:

$$x = x_0 \operatorname{sen} \theta$$

donde θ es el desplazamiento angular en el instante t.

Como, por definición, $\theta = \omega t$, esta ecuación para el desplazamiento se puede expresar de forma mucho más práctica en términos de t y de ω (o T, o f):

$$x = x_0 \operatorname{sen} \omega t$$

La curva de la velocidad, que comienza con la velocidad máxima, v_0, en $t = 0$, se puede representar mediante la ecuación siguiente, en la que aparece la función *coseno*:

$$v = v_0 \cos \omega t$$

En el Capítulo 6 vimos que, en general, en el caso de movimiento circular/oscilaciones, la velocidad $v = \omega r$, por tanto:

$$v_0 = \omega x_0$$

Entonces la ecuación para v se puede reescribir de una forma más práctica (sin necesidad de conocer v_0) como:

$$v = \omega x_0 \cos \omega t$$

Las dos ecuaciones para x y para v resaltadas arriba figuran en el *Apéndice de datos de Física*, e indican la variación temporal del desplazamiento y de la velocidad para un MAS con desplazamiento cero en el inicio del cuenteo de tiempo ($x = 0$ cuando $t = 0$). Podemos decir que son *soluciones* de la ecuación del MAS $a = -\omega^2 x$.

Podríamos escoger el inicio del conteo de tiempo del MAS cuando la partícula se encuentra en su valor máximo de desplazamiento respecto a la posición de equilibrio durante la oscilación, es decir, $x = x_0$ cuando $t = 0$. Las curvas representadas en la Figura 9.3 tendrían entonces el aspecto de las curvas de la Figura 9.4.

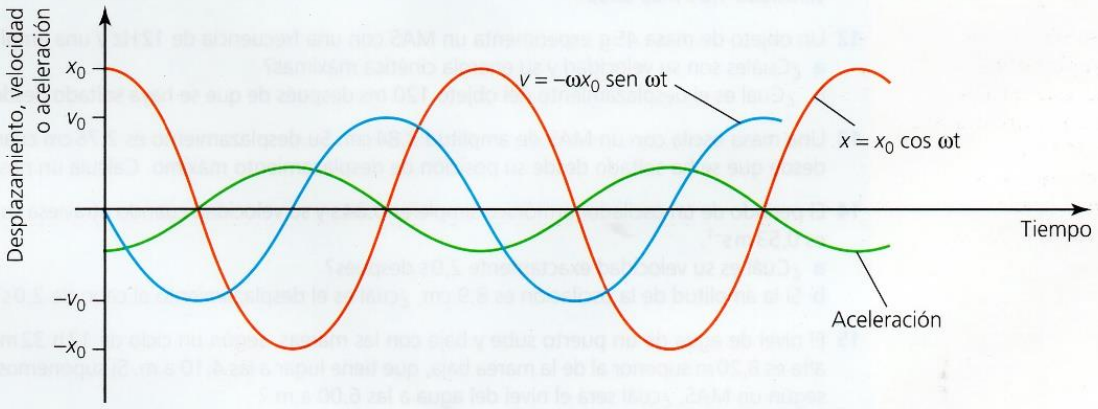


Figura 9.4
En este MAS el desplazamiento máximo de la partícula se produce al inicio del conteo de tiempo, es decir, $x = x_0$ cuando $t = 0$

En este caso, las soluciones de la ecuación del MAS son las siguientes:

$$x = x_0 \cos \omega t$$
$$v = -\omega x_0 \operatorname{sen} \omega t$$

Estas ecuaciones figuran en el *Apéndice de datos de Física*.

También se puede demostrar que la velocidad para cualquier desplazamiento conocido se puede calcular a partir de la ecuación:

$$v = \pm \omega \sqrt{x_0^2 - x^2}$$

Esta ecuación también figura en el *Apéndice de datos de Física.*

Esta ecuación confirma que la velocidad máxima, v_0, tiene lugar cuando la partícula atraviesa su posición de equilibrio (con desplazamiento nulo, $x = 0$), por tanto:

$$v_0 = \pm\omega x_0$$

Esta ecuación *no* figura en el *Apéndice de datos de Física.*

Ejemplo resuelto

3 Una masa oscilatoria se pone en movimiento con un MAS. El conteo de tiempo se inicia cuando la masa se encuentra en su punto de desplazamiento máximo, 12 cm, y el periodo de oscilación es de 2,4 s. Calcula:
a el desplazamiento al cabo de 3,3 s
b su velocidad máxima
c su velocidad al cabo de 5,6 s
d su velocidad cuando su desplazamiento es de 8,8 cm.

a $x = x_0 \cos \omega t$ y $\omega = \frac{2\pi}{T}$, con $x_0 = 0{,}12\,\text{m}$, $T = 2{,}4\,\text{s}$ y $t = 3{,}3\,\text{s}$

$$x = 0{,}12 \times \cos\left(\frac{2\pi}{2{,}4} \times 3{,}3\right) = 0{,}12 \times -0{,}704 = -0{,}084\ \text{m}$$

b $v_0 = \omega x_0 = \left(\frac{2\pi}{2{,}4}\right) \times 0{,}12 = 0{,}31\ \text{m s}^{-1}$

c $v = -v_0 \operatorname{sen} \omega t$ con $v_0 = 0{,}31\,\text{m s}^{-1}$ y $t = 5{,}6\,\text{s}$

$$v = 0{,}31 \times \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{2{,}4} \times 5{,}6\right) = 0{,}27\ \text{m s}^{-1}$$

d $v = \pm\omega \sqrt{x_0^2 - x^2}$ con $x = 0{,}088\,\text{m}$

$$v = \frac{2\pi}{2{,}4} \times \sqrt{0{,}12^2 - 0{,}088^2} = 0{,}21\,\text{m s}^{-1}$$

11 Una masa oscila entre dos muelles con una frecuencia de 1,5 Hz y una amplitud de 3,7 cm. La velocidad cuando atraviesa su posición de equilibrio y se inicia el conteo de tiempo es $34\,\text{cm s}^{-1}$. ¿Cuáles son su desplazamiento y su velocidad 1,8 s más tarde?

12 Un objeto de masa 45 g experimenta un MAS con una frecuencia de 12 Hz y una amplitud de 3,1 mm.
a ¿Cuáles son su velocidad y su energía cinética máximas?
b ¿Cuál es el desplazamiento del objeto 120 ms después de que se haya soltado desde su desplazamiento máximo?

13 Una masa oscila con un MAS de amplitud 3,84 cm. Su desplazamiento es 2,76 cm cuando han transcurrido 0,0217 s desde que se ha soltado desde su posición de desplazamiento máximo. Calcula un posible valor para su frecuencia.

14 El periodo de un oscilador armónico simple es 0,84 s y su velocidad cuando atraviesa su posición de (equilibrio) media es $0{,}53\,\text{m s}^{-1}$.
a ¿Cuál es su velocidad exactamente 2,0 s después?
b Si la amplitud de la oscilación es 8,9 cm, ¿cuál es el desplazamiento al cabo de 2,0 s?

15 El nivel de agua de un puerto sube y baja con las mareas, según un ciclo de 12 h 32 m. El nivel de agua en la marea alta es 8,20 m superior al de la marea baja, que tiene lugar a las 4.10 a.m. Si suponemos que las mareas suben y bajan según un MAS, ¿cuál será el nivel del agua a las 6.00 a.m.?

16 ¿Qué representa el área bajo la curva velocidad-tiempo de una oscilación?

Cambios de energía durante un MAS

Todas las oscilaciones mecánicas comportan un intercambio continuo entre la energía cinética y algunas formas de energía potencial. Por ejemplo, la energía potencial asociada al balanceo de un péndulo es gravitatoria, mientras que en el caso de una masa que oscila horizontalmente entre muelles, la energía potencial se almacena en los muelles en forma de energía de deformación elástica:

energía total, E_T = energía cinética, E_C + energía potencial, E_P

Sabemos que la energía cinética, $E_C = \frac{1}{2}mv^2$. Si combinamos esta ecuación con la ecuación anterior para v obtenemos la ecuación siguiente, que indica la variación de la EC con el desplazamiento durante un MAS:

$$E_C = \frac{1}{2}m\omega^2(x_0^2 - x^2)$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Esta relación se representa gráficamente en la Figura 9.5, en la que, además, se representan las curvas correspondientes a la energía total y a la energía potencial (= energía total – energía cinética).

La energía total es igual al valor *máximo* de la EC, que corresponde al valor de la EC cuando el desplazamiento es nulo y la energía potencial es nula. Es decir:

$$E_T = \frac{1}{2}m\omega^2x_0^2$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

La energía potencial se puede determinar a partir de la energía total menos la energía cinética:

$$E_P = \frac{1}{2}m\omega^2x^2$$

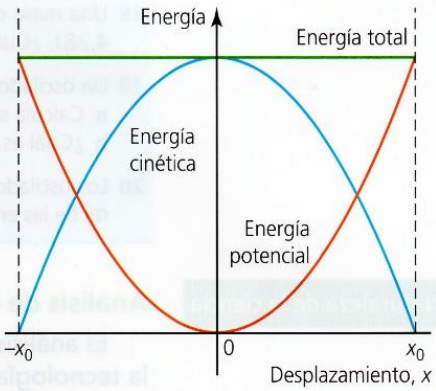


Figura 9.5
Variación de las energías de un oscilador armónico simple con el desplazamiento

Esta ecuación (que no figura en el *Apéndice de datos de Física*) confirma lo que ya vimos en el Capítulo 4 (página 161): la energía de una oscilación es proporcional al *cuadrado* de su amplitud. Por ejemplo, si el péndulo A se balancea con una amplitud que es el triple de la amplitud de un péndulo idéntico B, entonces la energía potencial del péndulo A es nueve (3^2) veces la energía potencial del péndulo B.

En este capítulo hemos tratado el intercambio entre la energía cinética y algún tipo de energía potencial en osciladores *mecánicos*, pero la utilidad de la teoría del MAS va mucho más allá. Por ejemplo, uno de los aspectos esenciales del aprendizaje en el ámbito de las comunicaciones por radio y teléfono es la comprensión de las oscilaciones en los circuitos *eléctricos*.

Ejemplo resuelto

4 Una masa de 1250 g oscila con un periodo de 0,56 s y una amplitud de 32 cm.
- **a** ¿Cuál es su energía total?
- **b** ¿Cuál es su energía potencial cuando su desplazamiento es 12 cm?
- **c** ¿Cuál es su energía cinética cuando se desplaza 12 cm?
- **d** ¿Cuál es su energía cinética cuando su desplazamiento es 4,3 cm?

a $E_T = \frac{1}{2}m\omega^2x_0^2$

$= 0{,}5 \times 1{,}25 \times \left(\frac{2\pi}{0{,}56}\right)^2 \times 0{,}32^2$

$= 8{,}1\,\text{J}$

b $E_P = \frac{1}{2}m\omega^2x^2$

$= 0{,}5 \times 1{,}25 \times \left(\frac{2\pi}{0{,}56}\right)^2 \times 0{,}12^2$

$= 1{,}13\,\text{J}$

c $E_T = E_P + E_C$

$8{,}1 = 1{,}13 + E_C$

$E_C = 7{,}0\,\text{J}$

d $E_C = \frac{1}{2}m\omega^2(x_0^2 - x^2)$

$= 0{,}5 \times 1{,}25 \times \left(\frac{2\pi}{0{,}56}\right)^2 \times (0{,}32^2 - 0{,}043^2)$

$= 7{,}9\,\text{J}$

17 Un péndulo largo de 2,6 kg de masa tiene una longitud, *l*, de 4,63 m.
- **a** Determina su periodo, *T*.
- **b** Explica por qué un péndulo con el doble de masa tiene el mismo periodo (si tiene la misma longitud).
- **c** El movimiento de un péndulo es una buena aproximación del MAS. Explica por qué la ecuación del periodo de un oscilador (como el péndulo) no incluye la amplitud.
- **d** ¿Cuál es la velocidad angular de este péndulo?
- **e** ¿Cuál es la energía total del oscilador si su amplitud es 1,2 m?
- **f** ¿Cuál es su velocidad cuando atraviesa la posición de equilibrio?

18 Una masa de 435 g oscila horizontalmente entre dos muelles con una frecuencia de 0,849 Hz. Si su energía total es 4,28 J, ¿Cuáles son su amplitud y su velocidad máxima?

19 Un oscilador de 786 g de masa tiene una energía total de 2,4 J.
- **a** Calcula su periodo si se mueve con una amplitud de 23 cm.
- **b** ¿Cuál es su velocidad cuándo se desplaza 10 cm?

20 Los osciladores reales disipan energía al entorno. Esboza una gráfica donde se represente la posible variación temporal de las energías potencial y cinética al cabo de varias oscilaciones de un oscilador real.

Naturaleza de la ciencia

Análisis de oscilaciones más complejas

El análisis de oscilaciones de muy diversos tipos es un ámbito muy importante de la física y de la tecnología. En este capítulo nos hemos centrado principalmente en la comprensión de los principios del MAS en osciladores que se mueven con frecuencia y amplitud constantes: oscilaciones que se pueden representar mediante una *única* función seno o coseno. El MAS es el punto de partida para el estudio de la totalidad de las oscilaciones, pero en la vida real la mayoría no son tan simples y sus formas de onda son mucho más complejas.

Sin embargo, las matemáticas aportan una solución: si es periódica, *cualquier* forma de onda, por compleja que sea, se puede reproducir mediante la adición (superposición) del número adecuado de funciones de onda trigonométricas simples (ondas seno y coseno). Este proceso se denomina **análisis de Fourier**. Esta idea ya la hemos visto brevemente en el Capítulo 4: los sonidos que producen los instrumentos musicales son la suma de una serie de *armónicos* que siguen una relación matemática. Se pueden utilizar programas de ordenador para sumar funciones de onda trigonométricas y representar los resultados gráficamente o, al revés, una forma de onda compleja se puede analizar para descomponerla en funciones matemáticas. La combinación de funciones trigonométricas simples para generar una forma de onda más compleja se denomina **síntesis de Fourier**.

9.2 Difracción por rendija simple

La difracción por rendija simple tiene lugar cuando la onda incide sobre una rendija cuyo tamaño es aproximadamente el mismo que el de la longitud de onda incidente

La difracción por rendija simple se trató brevemente en el Capítulo 4. En la Figura 9.6 se representa el uso de un láser para producir un patrón de difracción de una rendija simple sobre una pantalla.

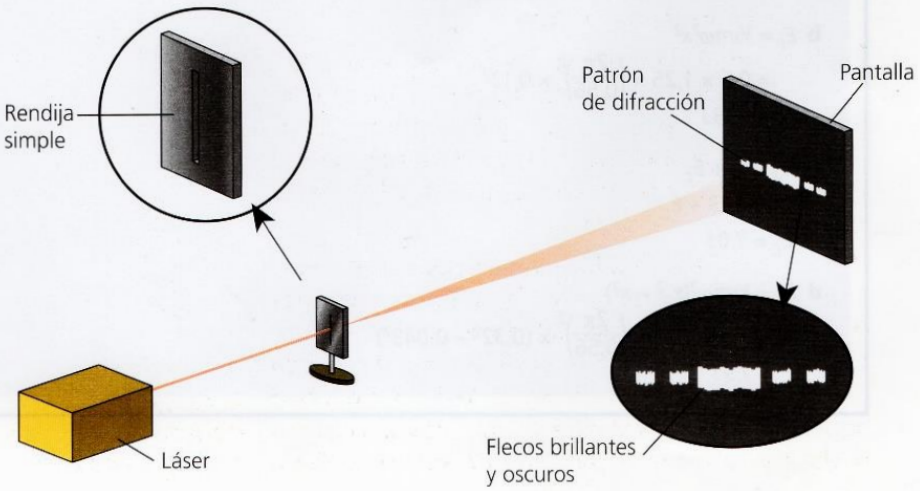


Figura 9.6
Difracción de la luz a través de una rendija simple

En la Figura 9.7a se muestra el patrón de difracción para un haz de luz monocromática que atraviesa una rendija vertical estrecha. Es el tipo de abertura que se acostumbra a utilizar para producir patrones de difracción simples. El patrón de difracción consiste en una serie de bandas (flecos) de luz y oscuridad. *La banda central es más brillante y es aproximadamente el doble de ancha que las demás.* Si se emplea una rendija ajustable, se puede observar cómo se ensancha el patrón a medida que la anchura de la rendija se reduce.

En la Figura 9.8 se muestra el patrón de difracción producido cuando una luz monocromática atraviesa una pequeña abertura *circular.*

Si comparamos las Figuras 9.7a y 9.8, podemos observar que la forma del patrón depende de la forma de la abertura. La luz que se emplea para producir estos patrones es *monocromática*, lo que significa que posee una única longitud de onda (y frecuencia), o un intervalo muy pequeño de longitudes de onda. La luz que procede de la mayoría de las fuentes no es monocromática y está compuesta por distintas longitudes de onda. En este caso no se obtiene un patrón tan simple porque las distintas longitudes de onda van a parar a diferentes lugares sobre la pantalla. El patrón producido por la luz blanca que atraviesa una rendija vertical tiene una banda central mayoritariamente de color blanco, pero las demás bandas muestran diversos efectos de color. La imagen inferior de la Figura 9.7b muestra el patrón producido por la luz blanca que atraviesa una rendija de la misma anchura que la que se ha empleado para producir la Figura 9.7a.

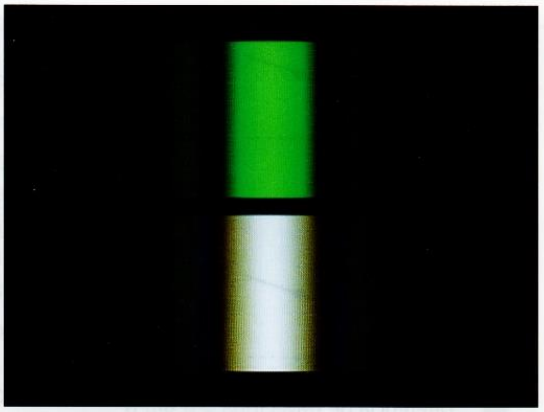


Figura 9.7
Difracción de **a** *luz monocromática y* **b** *luz blanca con una rendija vertical*

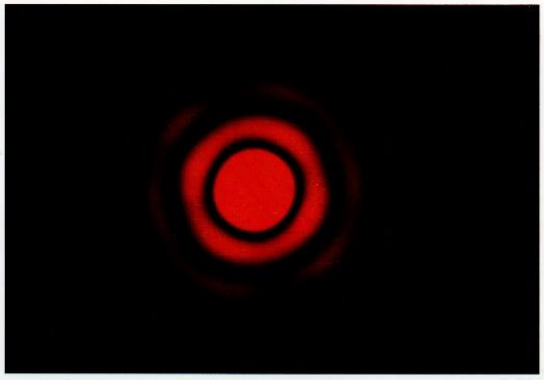


Figura 9.8
Luz monocromática difractada por una abertura circular muy pequeña

Naturaleza de la difracción por rendija simple

Para producir estos patrones de difracción de la luz, las ondas deben viajar hacia fuera de la abertura en determinadas direcciones, pero no en otras. La teoría simple de la difracción que estudiamos en el Capítulo 4 no explica este comportamiento. En la Figura 9.9a se representan las ondas difractadas que salen de un orificio que tiene aproximadamente la misma anchura que la longitud de onda (tal como se vio en el Capítulo 4). El orificio actúa, en efecto, como una fuente puntual, propagando ondas de forma equitativa hacia delante en *todas* direcciones. Pero esta imagen *no se puede* utilizar para ayudar a explicar la difracción de la luz, porque sus longitudes de onda son mucho menores que la anchura del orificio más pequeño. Por ejemplo, un orificio de 0,5 mm de diámetro es 1 000 veces más ancho que la longitud de onda de la luz verde (aproximadamente 5×10^{-7} m).

Para producir un patrón de difracción de la luz, como el de la Figura 9.7a, debemos desarrollar una teoría que explique por qué se propagan las ondas desde la abertura, tal como se muestra en la Figura 9.9b cuando la abertura es mucho mayor que la longitud de onda.

Los patrones de difracción se pueden explicar asumiendo que cada punto de un frente de ondas que atraviesa la rendija actúa como si fuera una fuente puntual de **ondas secundarias**. (Esta idea fue sugerida por primera vez en 1678 por el físico holandés Christiaan Huygens, que propuso que las ondas de luz se propagan hacia delante porque *to-*

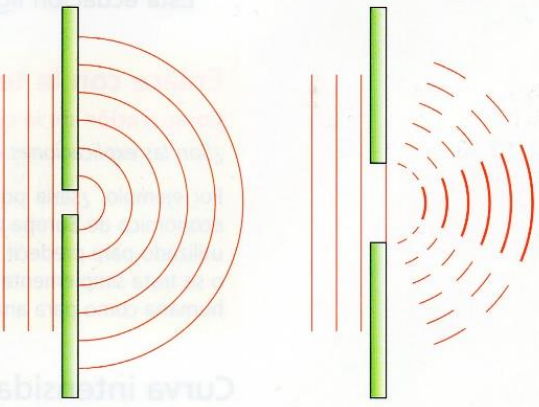


Figura 9.9
Difracción de ondas a través de aberturas de distintos tamaños

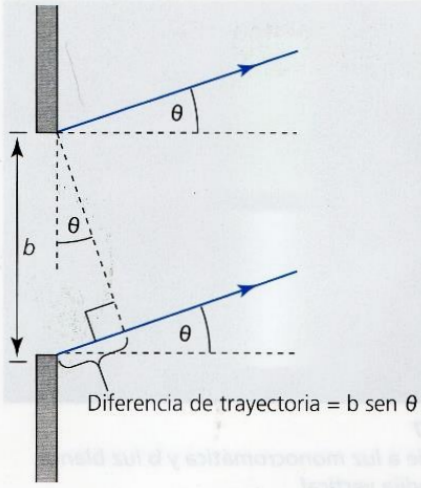


Figura 9.10
Diferencias de trayectoria e interferencia

dos los puntos de cualquier frente de onda actúan como fuentes de ondas secundarias). Lo que sucede una vez que la onda ha atravesado la rendija depende de la *interferencia* entre estas ondas secundarias.

En la Figura 9.10 se indica la dirección y el sentido, θ, de las ondas secundarias que se alejan de una rendija de anchura b. Si el valor de θ es cero, todas las ondas secundarias interfieren de forma constructiva en esta dirección (en línea recta a través de la rendija) porque no hay *diferencia de trayectoria* entre ellas. (En teoría, cuando las ondas viajan en direcciones paralelas evidentemente no se pueden ni cruzar ni interferir, de manera que suponemos que las direcciones de las ondas son *casi* paralelas).

Consideremos ahora lo que sucede cuando el ángulo aumenta. Como podemos ver a partir de la Figura 9.10, la diferencia de trayectoria viene dada por b sen θ y esta cantidad aumenta a medida que lo hace el ángulo θ. Existirá un ángulo para el cual las ondas procedentes de los dos extremos de la rendija interferirán de forma constructiva porque la diferencia de trayectorias habrá aumentado hasta alcanzar el valor de una longitud de onda, λ.

Pero, si las ondas secundarias procedentes de los extremos de la rendija interfieren de forma constructiva, ¿qué sucede con la interferencia entre todas las demás ondas secundarias? En la Figura 9.11 la rendija se ha dividido en un conjunto de fuentes puntuales de ondas secundarias. (Se han representado diez puntos, pero podrían ser muchos más).

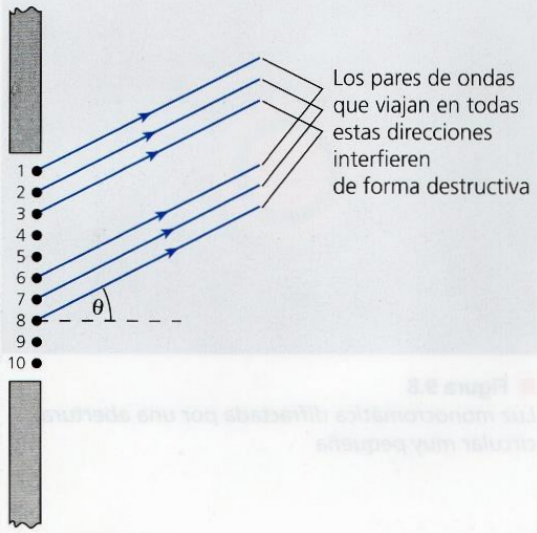


Figura 9.11
Las ondas secundarias que interfieren de forma destructiva se pueden «emparejar»

Si el ángulo, θ, es tal que las ondas secundarias procedentes de los puntos 1 y 10 interfieren de forma constructiva porque la diferencia de trayectoria es equivalente a una longitud de onda, las ondas secundarias procedentes de los puntos 1 y 6 deben tener una diferencia de trayectoria de media longitud de onda e interferir de forma destructiva. De forma análoga, las ondas de los puntos 2 y 7; 3 y 8; 4 y 9; 5 y 10 deben interferir de forma destructiva. Así, las ondas de *todos* los puntos se pueden «emparejar», de manera que el primer *mínimo* del patrón de difracción tiene lugar a un ángulo tal que las ondas procedentes de los extremos de la rendija interfieren al contrario, de forma constructiva.

El primer mínimo del patrón de difracción se produce cuando la diferencia de trayectoria entre las ondas secundarias procedentes de los extremos de la rendija equivale a una longitud de onda. Es decir, cuando b sen $\theta = \lambda$.

Cuando la rendija es muy estrecha, el ángulo θ normalmente es muy pequeño y se puede aproximar a sen θ si está expresado en radianes (aproximación válida para ángulos menores que 10°).

El ángulo para el que tiene lugar el primer mínimo de un patrón de difracción por rendija simple es $\theta = \frac{\lambda}{b}$.

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Enlace con la teoría del conocimiento

Comparación de la ciencia con otras áreas del conocimiento

¿Son las explicaciones en ciencia distintas de las de otras áreas del conocimiento, como la historia?

Por ejemplo, ¿sería posible, en principio, desarrollar un modelo matemático para describir la situación política y/o económica de Europa antes del estallido de la Primera Guerra Mundial? Y si ese modelo existiera, ¿se podría haber utilizado para predecir lo que ocurrió? ¿Hay una diferencia fundamental entre el conocimiento en física y en historia, o se trata simplemente de que cualquier situación histórica es demasiado compleja o dependiente de la personalidad humana como para analizarla matemáticamente?

Curva intensidad relativa – ángulo para la difracción por rendija simple

El razonamiento anterior permite demostrar que los siguientes mínimos de difracción tienen lugar para ángulos $2\lambda/b$, $3\lambda/b$, $4\lambda/b$, etc. En la Figura 9.12 se muestra una interpretación gráfica de estas cifras y su correspondencia aproximada con el diagrama de un patrón de difracción por rendija simple.

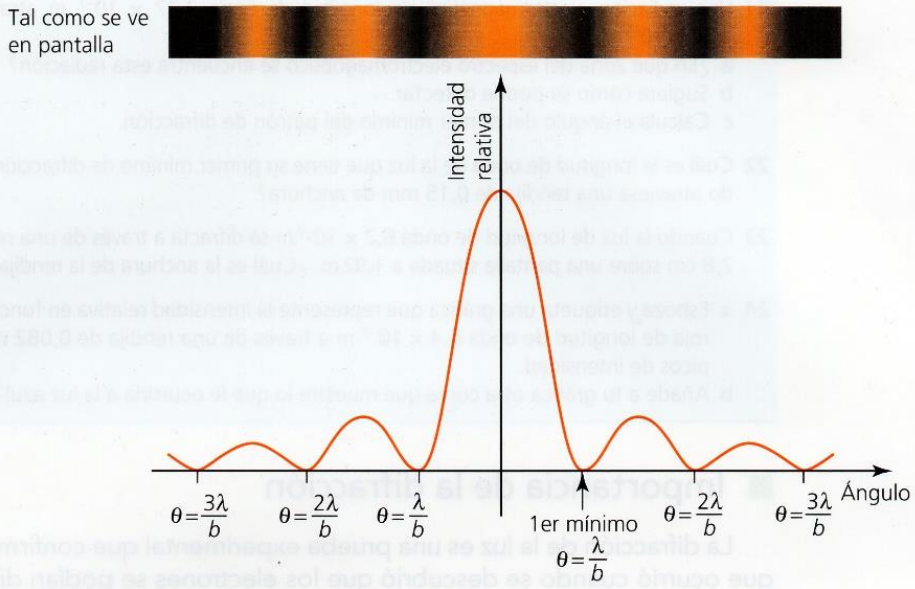


Figura 9.12
Variación de la intensidad con el ángulo en una difracción por rendija simple

Ejemplo resuelto

5 Un haz de luz monocromática de longitud de onda 663 nm atraviesa un orificio de 0,0730 mm de anchura.
a ¿A qué ángulo se produce el primer mínimo del patrón de difracción generado?
b Si se observa el patrón sobre una pantalla que está a 2,83 m de la rendija, ¿cuál es la anchura del máximo central?

a $\theta = \dfrac{\lambda}{b}$

$$\theta = \frac{663 \times 10^{-9}}{7{,}30 \times 10^{-5}}$$

$= 9{,}08 \times 10^{-3}$ radianes

b Véase la Figura 9.13.

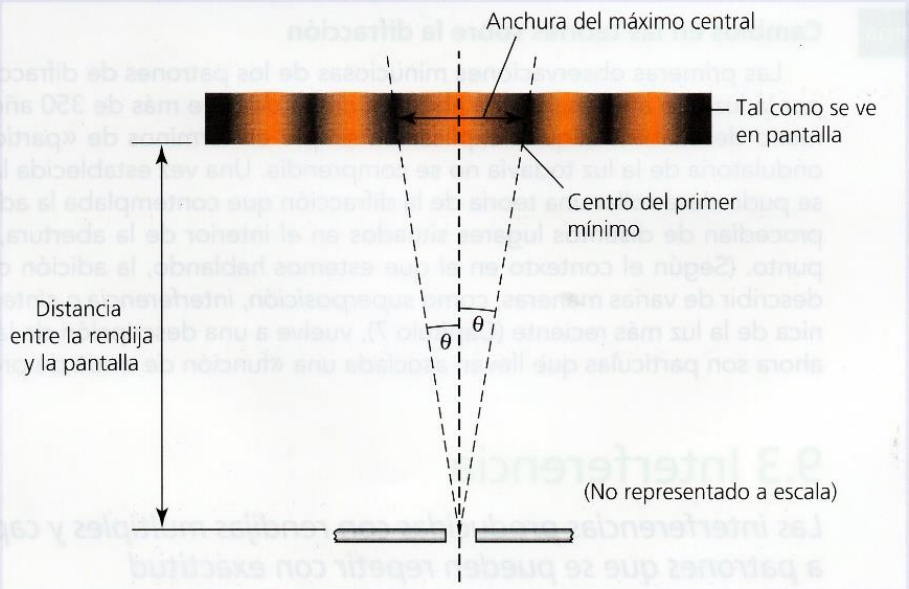


Figura 9.13

$\theta \approx \text{sen } \theta$

$$= \frac{\text{mitad de la anchura del máximo central}}{\text{anchura del máximo central}}$$

mitad de la anchura del máximo central $= (9{,}08 \times 10^{-3}) \times 2{,}83 = 0{,}0257$ m

anchura del máximo central $= 0{,}0257 \times 2 = 0{,}0514$ m

21 Una radiación electromagnética de longitud de onda $2{,}37 \times 10^{-7}$ m atraviesa una rendija estrecha de anchura $4{,}70 \times 10^{-5}$ m.
- **a** ¿En qué zona del espectro electromagnético se encuentra esta radiación?
- **b** Sugiere cómo se podría detectar.
- **c** Calcula el ángulo del primer mínimo del patrón de difracción.

22 Cuál es la longitud de onda de la luz que tiene su primer mínimo de difracción a un ángulo de 0,0038 radianes cuando atraviesa una rendija de 0,15 mm de anchura?

23 Cuando la luz de longitud de onda $6{,}2 \times 10^{-7}$ m se difracta a través de una rendija, la anchura del máximo central es 2,8 cm sobre una pantalla situada a 1,92 m. ¿Cuál es la anchura de la rendija?

24 **a** Esboza y etiqueta una gráfica que represente la intensidad relativa en función del ángulo, para la difracción de luz roja de longitud de onda $6{,}4 \times 10^{-7}$ m a través de una rendija de 0,082 mm de anchura. Incluye al menos cinco picos de intensidad.
- **b** Añade a tu gráfica otra curva que muestre lo que le ocurriría a la luz azul al atravesar la misma rendija.

Importancia de la difracción

La difracción de la luz es una prueba experimental que confirma su naturaleza ondulatoria, igual que ocurrió cuando se descubrió que los electrones se podían difractar (Capítulo 12). Otras radiaciones electromagnéticas experimentan una difracción significativa cuando atraviesan objetos u orificios cuyo tamaño es comparable al de sus longitudes de onda. Por ejemplo, la difracción de los rayos X debida a los átomos, iones y moléculas se puede utilizar para obtener información detallada sobre los sólidos de estructura regular. La difracción de las ondas de radio utilizadas en comunicaciones tiene una considerable importancia a la hora de escoger la longitud de onda adecuada para enviar información de manera eficiente desde el transmisor al receptor.

Las direcciones de las ondas que viajan de un lugar a otro pueden verse afectadas por la difracción, y otro tanto les sucede a las ondas emitidas o recibidas: se puede considerar que atraviesan una abertura, de manera que el cociente λ/b será importante a la hora de considerar cómo se propagan las ondas emitidas por la fuente, o bien desde qué dirección parecen provenir cuando son recibidas.

La diferencia fundamental entre difracción e interferencia puede ser confusa. La difracción es la propagación de ondas alrededor de obstáculos y esquinas, e incluso orificios, pero cuando hablamos de *patrón* de difracción nos referimos al resultado de la interferencia entre frentes de ondas producidos por la difracción.

Naturaleza de la ciencia

Cambios en las teorías sobre la difracción

Las primeras observaciones minuciosas de los patrones de difracción producidos en la sombra por la luz que atravesaba una abertura datan de hace más de 350 años. En aquella época el fenómeno desafiaba cualquier explicación simple en términos de «partículas» de luz, y la naturaleza ondulatoria de la luz todavía no se comprendía. Una vez establecida la teoría ondulatoria de la luz, se pudo desarrollar una teoría de la difracción que contemplaba la adición de formas de onda que procedían de distintos lugares situados en el interior de la abertura, y que llegaban a un mismo punto. (Según el contexto en el que estemos hablando, la adición de formas de onda se puede describir de varias maneras, como *superposición*, *interferencia* o *síntesis de Fourier*). La teoría fotónica de la luz más reciente (Capítulo 7), vuelve a una descripción de la luz como «partículas», pero ahora son partículas que llevan asociada una «función de onda de probabilidad» (Capítulo 12).

9.3 Interferencia

Las interferencias producidas con rendijas múltiples y capas delgadas dan lugar a patrones que se pueden repetir con exactitud

La interferencia de ondas se introdujo en el Capítulo 4, donde se explicó que la condición necesaria para que se produzca una interferencia es que las fuentes sean **coherentes**. Ahora repasaremos brevemente los principios fundamentales. Es recomendable que los estudiantes hagan uso de algunas de las muchas simulaciones de ordenador sobre interferencias disponibles.

En la Figura 9.14 se representan dos fuentes coherentes, S_1 y S_2, así como las ondas que emiten.

Las líneas azules representan las crestas de las ondas y los valles están en los puntos medios entre estas. En puntos como el P se unen dos crestas pero, al cabo de muy poco tiempo, se unen dos valles. Las ondas que llegan a puntos como el P siempre lo hacen en fase, y podemos determinar la interferencia constructiva que tiene lugar mediante el principio de superposición.

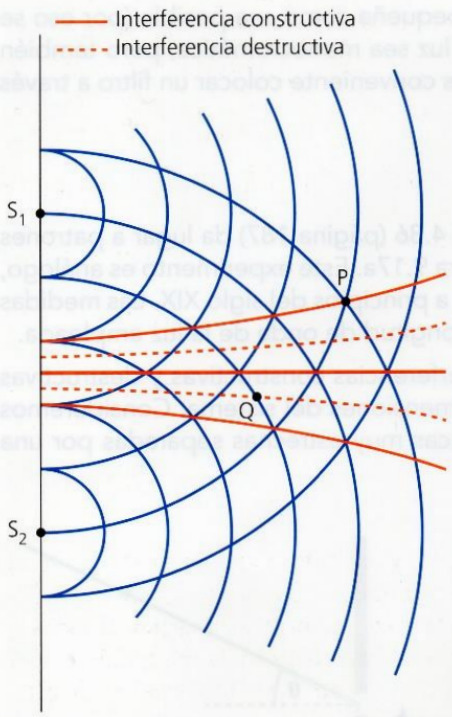


Figura 9.14
Dos conjuntos de ondas coherentes que se cruzan para producir un patrón de interferencias

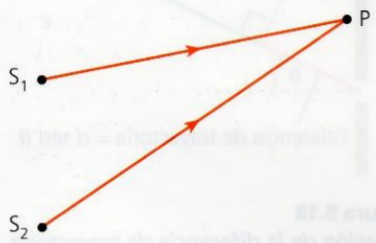


Figura 9.15
Diferencia de trayectorias

En puntos como el Q, los dos conjuntos de ondas siempre están exactamente en contrafase y, por tanto, siempre tiene lugar una interferencia destructiva. En otros puntos, la interferencia no es ni totalmente constructiva ni totalmente destructiva. Así, las ondas viajeras procedentes de cualquier tipo de fuente coherente pueden dar lugar a patrones de interferencia estacionaria.

Predicción del lugar donde se produce la interferencia constructiva

Para formular una ecuación que prediga donde se producirá exactamente una interferencia constructiva (o destructiva) necesitamos tener en cuenta las diferencias de trayectoria.

En la Figura 9.15 se utilizan rayos para representar las direcciones en las que viajan las ondas, y está claro que la distancia que han recorrido las ondas que llegan al punto P desde S_2 es mayor que la recorrida por las ondas que llegan desde S_1. Decimos que hay una *diferencia de trayectorias* entre las ondas ($S_2P - S_1P$).

Se produce una interferencia constructiva cuando la diferencia de trayectorias entre las ondas es igual a cero, o bien una longitud de onda, o dos, o tres, etc.

La condición para una interferencia *constructiva* es que la diferencia de trayectorias = $n\lambda$ (donde n es un entero: 1, 2, 3, 4, 5, etc.).

La condición para una interferencia *destructiva* es que la diferencia de trayectorias sea igual a un número impar de medias longitudes de onda. Diferencia de trayectorias = $(n + \frac{1}{2})\lambda$.

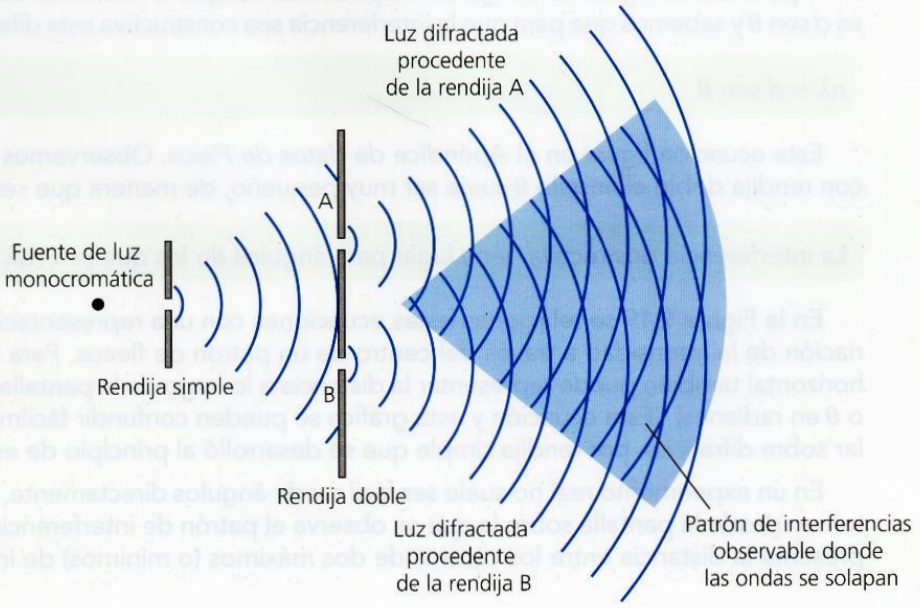
Estas ecuaciones para la diferencia de trayectorias figuran en el *Apéndice de datos de Física* (para el Capítulo 4).

Interferencia de ondas luminosas

Las ondas luminosas no suelen ser coherentes, por tanto, la interferencia de la luz no es, por lo general, un fenómeno del que seamos conscientes. La luz láser (que es tanto monocromática como coherente) es la fuente ideal para la producción de patrones de interferencias, aunque no es la única.

En lugar de usar dos fuentes distintas, se divide la luz procedente de una única fuente en dos partes mediante dos rendijas estrechas que deben estar muy próximas. Las ondas que atraviesan cada una de las rendijas experimentan una difracción, y las rendijas actúan como fuentes coherentes de las ondas que se propagan a través de ellas (Figura 9.16). Por regla general sabemos que, para que la difracción sea significativa, el tamaño del orificio debe ser comparable al tamaño de la longitud de onda, por tanto, los orificios deben ser muy estrechos (porque la longitud de onda de la luz es muy pequeña).

Figura 9.16
Patrón de interferencias producido mediante dos rendijas



La fuente luminosa original debe ser tan brillante y tan pequeña como sea posible (por eso se coloca una rendija delante de la fuente). Lo ideal es que la luz sea monocromática, pero también se puede emplear una fuente de luz blanca, y en ese caso es conveniente colocar un filtro a través de la rendija para reducir el rango de longitudes de onda.

Experimento con rendija doble de Young

La disposición experimental que se muestra en la Figura 4.86 (página 187) da lugar a patrones de interferencia como los que se pueden observar en la Figura 9.17a. Este experimento es análogo, en cuanto a procedimiento, al que desarrolló Thomas Young a principios del siglo XIX. Las medidas obtenidas se pueden utilizar para determinar el valor de la longitud de onda de la luz empleada.

Si queremos predecir las ubicaciones exactas de las interferencias constructivas y destructivas debemos relacionar las diferencias de trayectoria con las dimensiones del sistema. Consideremos la Figura 9.18, en la que se representan dos rendijas idénticas muy estrechas separadas por una distancia d (entre los centros de las rendijas).

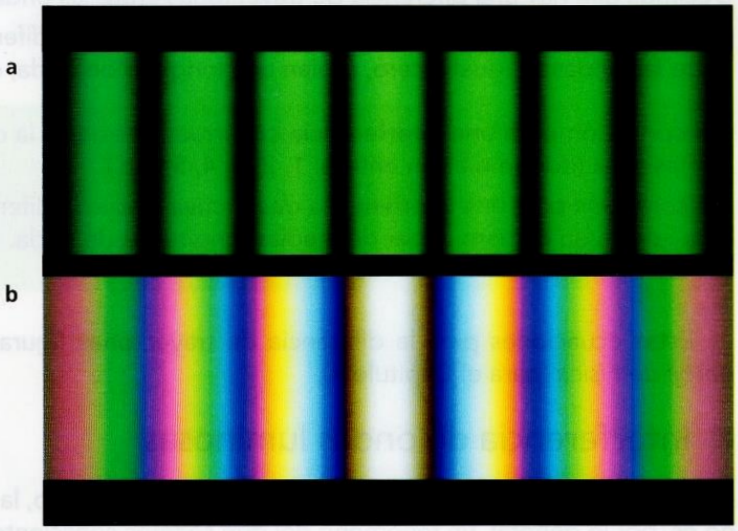


Figura 9.17
Patrones de interferencia por rendija doble de **a** *luz monocromática y* **b** *luz blanca*

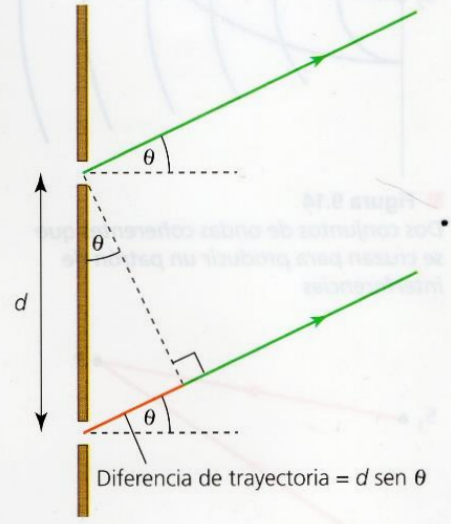


Figura 9.18
Explicación de la diferencia de trayectoria = d sen θ

Observemos que d es significativamente mayor que las anchuras individuales de ambas rendijas. Los vectores representan los rayos que indican la dirección de las ondas que salen de ambas rendijas formando un ángulo θ con la normal. Supongamos que estas ondas se encuentran e interfieren de forma constructiva en un punto lejano. Evidentemente, si los rayos son perfectamente paralelos no se pueden encontrar, por eso debemos suponer que, como el punto es muy lejano (en comparación con la separación de las rendijas), los rayos son casi paralelos.

A partir del triángulo de la Figura 9.18 podemos ver que la diferencia de trayectoria entre los rayos es d sen θ y sabemos que para que la interferencia sea constructiva esta diferencia debe ser igual a $n\lambda$:

$$n\lambda = d \operatorname{sen} \theta$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*. Observemos que en los experimentos con rendija doble el ángulo θ suele ser muy pequeño, de manera que sen $\theta \approx \theta$ en radianes.

La interferencia destructiva tiene lugar para ángulos en los que $(n + \frac{1}{2})\lambda = d$ sen θ.

En la Figura 9.19 se relacionan estas ecuaciones con una representación esquemática de la variación de la intensidad a través del centro de un patrón de flecos. Para ángulos pequeños, el eje horizontal también puede representar la distancia a lo largo de la pantalla (como alternativa a sen θ o θ en radianes). (Esta ecuación y esta gráfica se pueden confundir fácilmente con un estudio similar sobre difracción por rendija simple que se desarrolló al principio de este capítulo.)

En un experimento real no suele ser fácil medir ángulos directamente, por tanto, las medidas se toman desde la pantalla sobre la que se observa el patrón de interferencias. En la Figura 9.20, s representa la distancia entre los centros de dos máximos (o mínimos) de interferencia consecutivos.

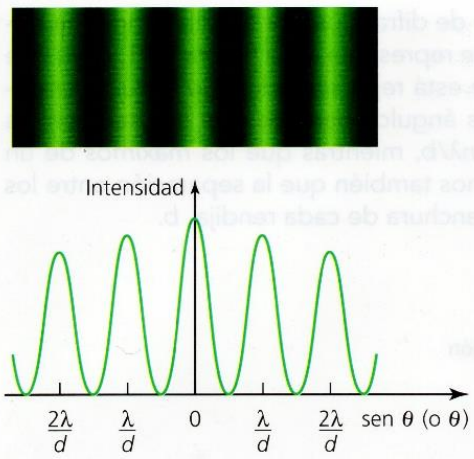


Figura 9.19
Variación de la intensidad con el ángulo para una interferencia por rendija doble

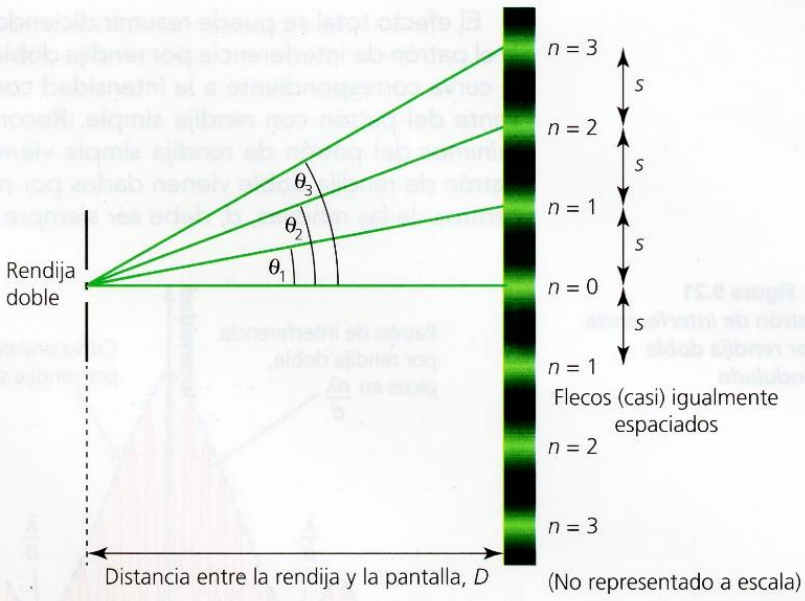


Figura 9.20
Separación y numeración de los flecos que se ven sobre la pantalla

Podemos considerar que el valor de s es constante a lo largo de la pantalla, suponiendo que el ángulo θ es lo bastante pequeño como para que sen θ sea aproximadamente igual a θ y a tg θ.

A partir de $n\lambda = d \operatorname{sen}\theta$, observamos que:

$$1\lambda = d \operatorname{sen}\theta_1$$

$$2\lambda = d \operatorname{sen}\theta_2$$

$$3\lambda = d \operatorname{sen}\theta_3$$

etc.

Para ángulos pequeños:

$$\operatorname{sen}\theta_1 = \operatorname{tg}\theta_1 = \theta_1 = \frac{s}{D}$$

Por tanto, $1\lambda = d\left(\frac{s}{D}\right)$ se puede reescribir en la forma utilizada en el Capítulo 4:

$$s = \frac{\lambda D}{d}$$

Ejemplo resuelto

6 La luz monocromática de longitud de onda $5{,}9 \times 10^{-7}$ m que atraviesa dos rendijas estrechas se dirige hacia una pantalla situada a 2,4 m de distancia. Sobre la pantalla se observa una serie de flecos brillantes y oscuros de tal manera que la distancia entre los centros de dos flecos brillantes (o dos flecos oscuros) consecutivos es 1,1 cm. ¿Cuál es la separación de las rendijas?

$$s = \frac{\lambda D}{d}$$

$$s = 1{,}1 \times 10^{-2} = \frac{(5{,}9 \times 10^{-7}) \times 2{,}4}{d}$$

$$d = 1{,}3 \times 10^{-4} \text{ m}$$

Modulación de un patrón de interferencia mediante el efecto de difracción producido por una rendija simple

En el análisis del patrón de interferencia que acabamos de presentar hemos ignorado, con el propósito de simplificar, un importante factor: la luz que emerge de cada rendija se difracta y da lugar, a su vez, a un patrón de difracción, tal como se ha explicado al principio de este capítulo. Si la difracción de la luz que emerge de cada una de las dos rendijas idénticas presenta un mínimo de la intensidad para un ángulo determinado, entonces se producirá también un mínimo en el patrón de interferencia para ese ángulo, incluso aunque la ecuación para la rendija doble prediga un máximo.

El efecto total se puede resumir diciendo que el patrón de difracción por rendija simple *modula* el patrón de interferencia por rendija doble. Este efecto se representa en la Figura 9.21, en la que la curva correspondiente a la intensidad con rendija doble está representada bajo la *curva envolvente* del patrón con rendija simple. Recordemos que los ángulos para los que se predicen los *mínimos* del patrón de rendija simple vienen dados por $n\lambda/b$, mientras que los *máximos* de un patrón de rendija doble vienen dados por $n\lambda/d$. Observemos también que la separación entre los centros de las rendijas, d, debe ser *siempre* menor que la anchura de cada rendija, b.

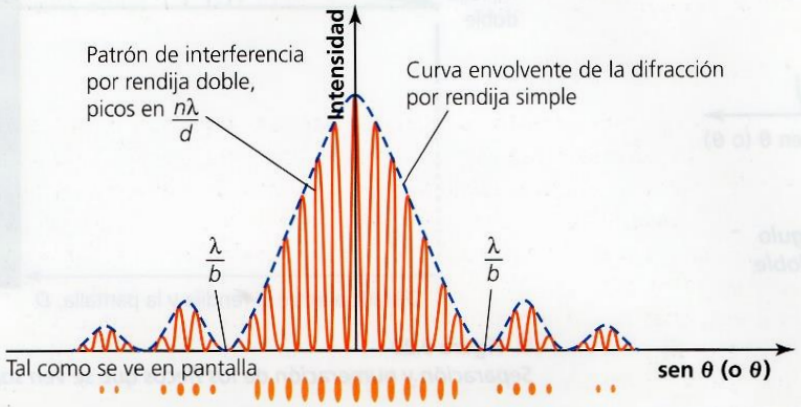


Figura 9.21
Patrón de interferencia por rendija doble modulado

Enlace con la teoría del conocimiento

Justificación de las simplificaciones

La mayoría de las descripciones de las interferencias por rendija doble se pueden realizar sin tener en cuenta el efecto modulador de la rendija simple. ¿Hasta qué punto pueden ignorar los científicos partes de un modelo en aras de la simplicidad y de la claridad?

Cuando introducimos la teoría de la interferencia por rendija doble en un libro como este, es mucho más fácil tratar las interferencias de las ondas luminosas procedentes de las dos rendijas por separado e ignorar los efectos del patrón de difracción asociado a cada rendija. Las complicaciones se pueden abordar solo cuando se ha explicado y se ha comprendido la teoría elemental. Este proceso educativo es habitual en ciencia, y es muy frecuente que nos digan que el «conocimiento» que hemos adquirido en las lecciones anteriores corresponde a haber efectuado una simplificación y que, por tanto, no representa la verdad absoluta.

25 **a** Un haz de luz de longitud de onda 450 nm atraviesa dos rendijas separadas 0,10 mm. Calcula el ángulo para el que se produce el primer máximo.
b Esboza una curva de la variación de la intensidad a lo largo del patrón de interferencia.
c ¿Cuál es la separación de los flecos observados sobre una pantalla situada a 3,0 m de las rendijas?

26 Argumenta por qué es difícil observar las interferencias de la luz procedente de una bombilla doméstica mediante una rendija doble.

27 La separación angular entre los centros del primer y del cuarto fleco brillante de un patrón de interferencia es $1{,}23 \times 10^{-3}$ rad. Calcula la separación entre las dos rendijas que generan el patrón si la longitud de onda empleada es 633 nm.

28 Se lleva a cabo un experimento con rendija doble de Young para determinar la longitud de onda de la luz empleada. Las rendijas están separadas 0,14 mm y la separación entre los flecos brillantes observados sobre una pantalla que se encuentra a una distancia de 1,8 m, es 6,15 mm.
a ¿Cuál es el resultado del experimento?
b Explica qué le sucedería a la separación entre los flecos si el experimento se repitiera en agua (índice de refracción = 1,3).

29 En un experimento escolar para visualizar interferencias, se colocan dos rendijas de 3 cm de ancho cada una frente a una fuente de microondas. La distancia entre las rendijas es 12 cm.
a Sugiere por qué se ha escogido una anchura de las rendijas de 3 cm.
b A una cierta distancia, se desplaza un detector de microondas a lo largo de una línea paralela a la que une las rendijas. El desplazamiento del detector entre dos máximos consecutivos es de 24 cm. Estima la distancia aproximada entre el detector y las rendijas.

30 Se observa sobre una pantalla el patrón de interferencia producido por la luz monocromática que atraviesa una rendija doble. ¿Qué le sucede al patrón si tiene lugar cada uno de los cambios siguientes (por separado)?
a Se utiliza luz con mayor longitud de onda.
b Se aumenta la distancia entre la rendija y la pantalla.
c Se acercan las rendijas.
d Se utiliza luz blanca.

31 Un avión vuela en altura directamente entre dos torres de antena que emiten ondas electromagnéticas coherentes de frecuencia 6,0 MHz. Si la intensidad de la señal que detecta el avión alcanza un máximo cada 0,096 s, ¿qué velocidad lleva el avión?

32 Un haz de luz monocromática de longitud de onda $5{,}8 \times 10^{-7}$ m atraviesa dos rendijas paralelas de anchura 0,032 mm, cuyos centros están separados 0,27 mm. Demuestra mediante los cálculos adecuados que los flecos octavo y noveno correspondientes a cada lado del centro del patrón no son claramente visibles.

Patrones de interferencia con rendijas múltiples y con rejillas de difracción

Rendijas múltiples

Como ya hemos visto, podemos obtener un patrón de flecos de interferencia utilizando un haz de luz que incide en un total de dos rendijas. Si aumentamos el número de rendijas (de la misma anchura y separación), el patrón de difracción/interferencia observado tendrá una intensidad cada vez mayor, pero los máximos se seguirán produciendo en los mismos ángulos, porque la longitud de onda y la separación entre las rendijas no han cambiado. Sin embargo, la característica más importante que observamos es que cuantas más rendijas utilizamos, más escarpados son los máximos y, además, están ubicados de forma más precisa en esos ángulos determinados. Este fenómeno se puede observar en la Figura 9.22, en la que se comparan los patrones observados utilizando luz monocromática que atraviesa dos, cinco y diez rendijas respectivamente.

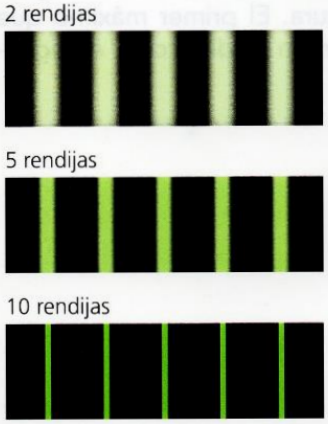


Figura 9.22
Variación del patrón de interferencia según el número de rendijas asociadas

Rejillas de difracción

Si la luz que incide normalmente sobre las rendijas no es monocromática, sino que contiene un intervalo de longitudes de onda, los máximos de las distintas longitudes de onda se producen a ángulos ligeramente distintos, de manera que la luz se *dispersa*. Si se utiliza un pequeño número de rendijas los distintos máximos se solaparán, pero se pueden separar (resolver) aumentando el número de rendijas. Una **rejilla de difracción** (véase Figura 9.23) está compuesta por un gran número de rendijas muy juntas, y se utiliza para dispersar la luz en distintas longitudes de onda. La resolución proporcionada por una rejilla de difracción se denomina **poder de resolución cromático**, y se estudiará en el apartado 9.4.

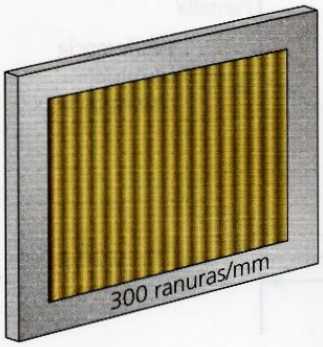


Figura 9.23
Rejilla de difracción

Las rendijas de una rejilla de difracción se suelen denominar «ranuras». Una rejilla de difracción convencional puede tener 600 ranuras por milímetro, lo que representa un espaciado, d, de unos $1{,}7 \times 10^{-6}$ m entre ranuras. Este valor corresponde aproximadamente a tres longitudes de onda medias de luz visible y, por tanto, es mucho menor que los espaciados de rendija doble que hemos estudiado anteriormente. La consecuencia es que las rejillas de difracción habitualmente desvían la luz con ángulos mucho mayores que las rendijas dobles.

Las rejillas de difracción se utilizan de forma generalizada para analizar la luz y representan una alternativa a los prismas de vidrio, que utilizan la *refracción* de la luz (en lugar de la difracción) para dispersarla. Una de las aplicaciones habituales de las rejillas es el estudio de los espectros de emisión y de absorción, tal como se explica en el Capítulo 7.

Se puede fabricar un **espectroscopio** simple para observar espectros mediante un tubo opaco con una rejilla de difracción en uno de sus extremos y una rendija estrecha en el otro (Figura 9.24).



Figura 9.24
Observación de espectros mediante un espectroscopio

Uso de una rejilla de difracción para medir longitudes de onda

La ecuación que se utiliza para predecir los ángulos en los que se producirán interferencias constructivas con dos rendijas separadas una distancia d, también se puede aplicar a las rendijas múltiples y a las rejillas con un espaciado d entre ranuras:

$$v\lambda = d \operatorname{sen} \theta$$

En la Figura 9.25 se muestra el uso de una rejilla de difracción para producir un patrón de interferencias (de luz monocromática). En muchos experimentos prácticos se utilizan lentes convergentes para enfocar la luz sobre la pantalla, pero no es así en esta figura. El primer máximo que aparece, visto desde el punto medio del patrón, se denomina primer orden de difracción, el segundo es el segundo orden de difracción, y así sucesivamente.

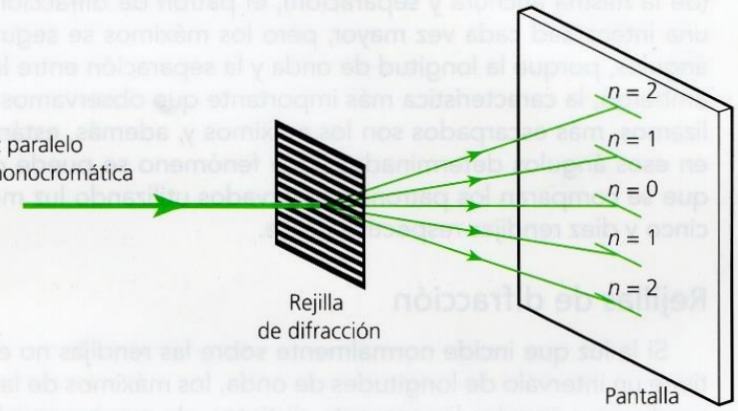


Figura 9.25
Cómo actúa una rejilla de difracción para producir distintos órdenes

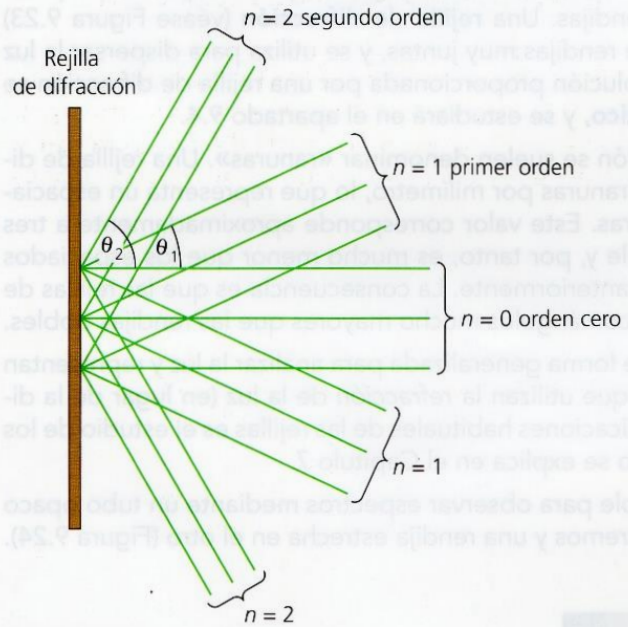


Figura 9.26
Distintos órdenes en distintas direcciones

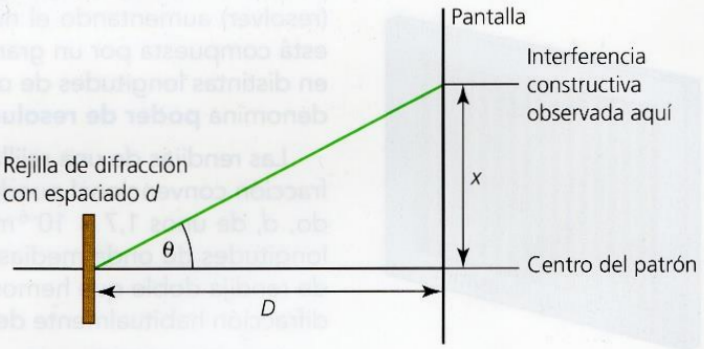


Figura 9.27
Medidas necesarias para determinar la longitud de onda

En la Figura 9.26 se muestran grupos de rayos adyacentes que emergen en distintas direcciones. Todas las ondas que se transmiten a lo largo de la normal interfieren de forma constructiva porque no hay diferencia de trayectoria entre ellas. Se denomina el orden cero, $n = 0$.

Los rayos que emergen a un ángulo θ_1, interfieren nuevamente de forma constructiva porque la diferencia de trayectoria entre rayos adyacentes es de una longitud de onda ($n = 1$). Se denomina el primer orden.

El segundo orden tiene lugar a un ángulo θ_2, para el cual la diferencia de trayectoria entre rayos adyacentes es de dos longitudes de onda ($n = 2$). Las rejillas de difracción se suelen diseñar con separaciones muy pequeñas entre rendijas, con el objetivo de dispersar la luz tanto como sea posible. Nuestra atención se centra normalmente en los órdenes más bajos, de manera que no se suelen necesitar los órdenes más altos.

Para determinar la longitud de onda usando una rejilla de difracción, se toman medidas desde una pantalla situada a una distancia conocida y lo suficientemente alejada como para poder calcular sen θ (Figura 9.27). Como las rejillas de difracción se suelen utilizar para producir separaciones angulares grandes, no podemos aplicar la aproximación sen $\theta \approx \theta$ sin introducir un error significativo.

Ejemplo resuelto

7 Un haz de luz monocromática atraviesa una rejilla de difracción con 400 ranuras mm^{-1} y genera un patrón de interferencias sobre una pantalla situada a 2,25 m.

a Si la distancia entre el máximo central y el primer orden es 57,2 cm, ¿cuál es la longitud de onda de la luz?

b Si un segundo haz de luz monocromática de longitud de onda $6{,}87 \times 10^{-7}$ m también atraviesa la rejilla, ¿cuál es la separación entre los primeros órdenes sobre la pantalla?

a Considerando la Figura 9.27, $\text{tg}\,\theta_1 = 0{,}572/2{,}25 = 0{,}254$, por tanto $\theta_1 = 14{,}3$ y $\text{sen}\,\theta_1 = 0{,}246$.

$n\lambda = d\,\text{sen}\,\theta$

$1 \times \lambda = d\,\text{sen}\,\theta_1$

$\lambda = \dfrac{1{,}0 \times 10^{-3}}{400} \times 0{,}246$

$\lambda = 6{,}16 \times 10^{-7}$ m

(Si utilizamos la aproximación $\text{sen}\,\theta \approx \text{tg}\,\theta$ la respuesta es $6{,}36 \times 10^{-7}$ m.)

b $1 \times \lambda = d\,\text{sen}\,\theta_1$

$6{,}87 \times 10^{-7} = \dfrac{(1{,}0 \times 10^{-3})}{400} \times \text{sen}\,\theta_1$

$\text{sen}\,\theta_1 = 0{,}275$

Por tanto $\theta = 16{,}0°$ y $\text{tg}\,\theta = 0{,}286$.

tg θ = distancia entre el máximo central y el primer orden dividida entre la distancia pantalla-rendija.

La distancia entre el máximo central y el primer orden es = $0{,}286 \times 2{,}25 = 0{,}643$ m. Por tanto, la separación sobre la pantalla entre los órdenes = (64,3 – 57,2) = 7,1 cm.

Uso de una rejilla de difracción para el análisis de espectros que contienen distintas longitudes de onda

El principal motivo por el que las rejillas de difracción son de tanta utilidad es porque producen máximos muy escarpados e intensos. En la Figura 9.28 se comparan las intensidades relativas producidas por una rendija doble (utilizando luz monocromática) y por una rejilla de difracción con el mismo espaciado. Comparemos este gráfico con el de la Figura 9.22, en la que se muestra el efecto visual del aumento del número de rendijas.

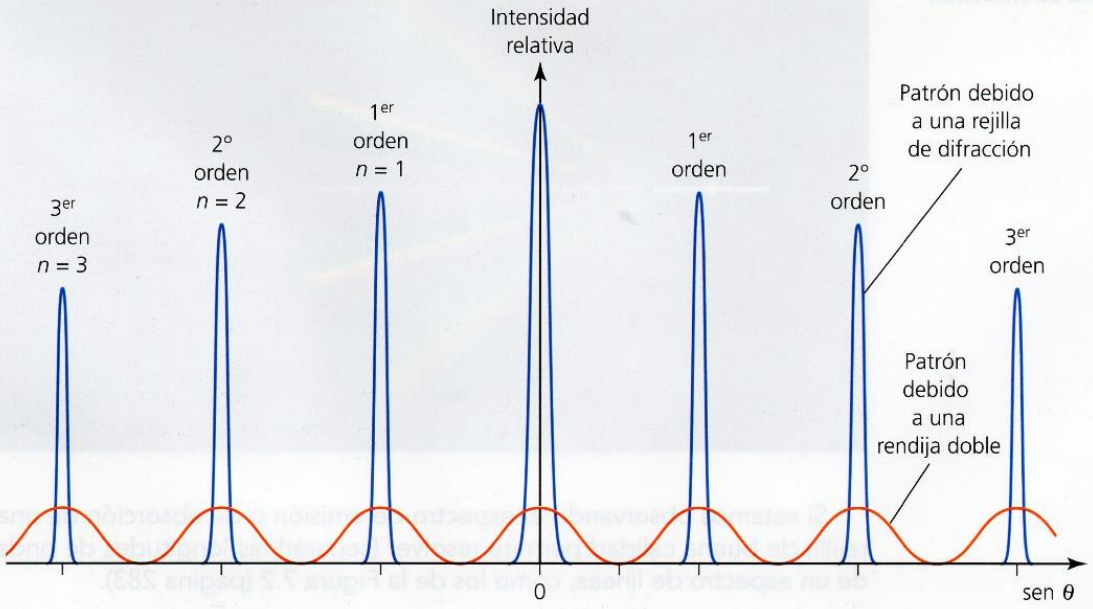
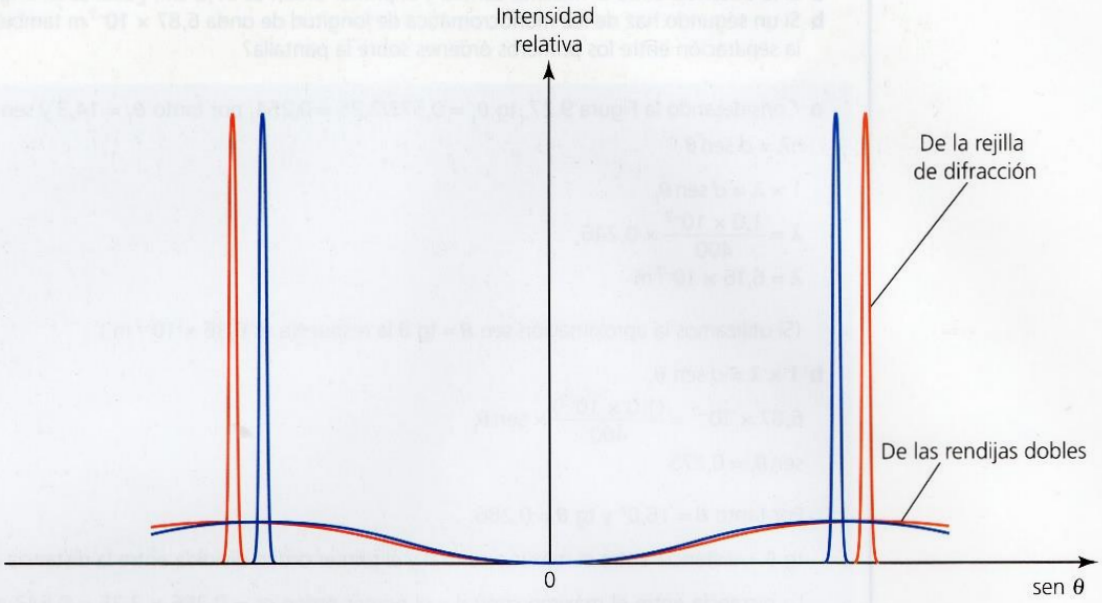


Figura 9.28 *Comparación entre los máximos producidos con una rendija doble y con una rejilla de difracción usando luz monocromática*

Cuando la luz incide sobre un gran número de rendijas hay, a su vez, un gran número de ondas procedentes de rendijas diferentes que llegan a cualquier punto sobre la pantalla. Pero, a menos que el ángulo sea el adecuado para que se produzca una interferencia constructiva (representada por la ecuación $n\lambda = d\,\text{sen}\,\theta$), el número de ondas en contrafase que llegan a este punto es sufi-

ciente como para que el resultado final sea una interferencia destructiva. En la práctica, la luz que incide sobre una rejilla lo hace sobre más de 1000 rendijas, de modo que los picos se vuelven mucho más escarpados y más intensos que los de la Figura 9.28.

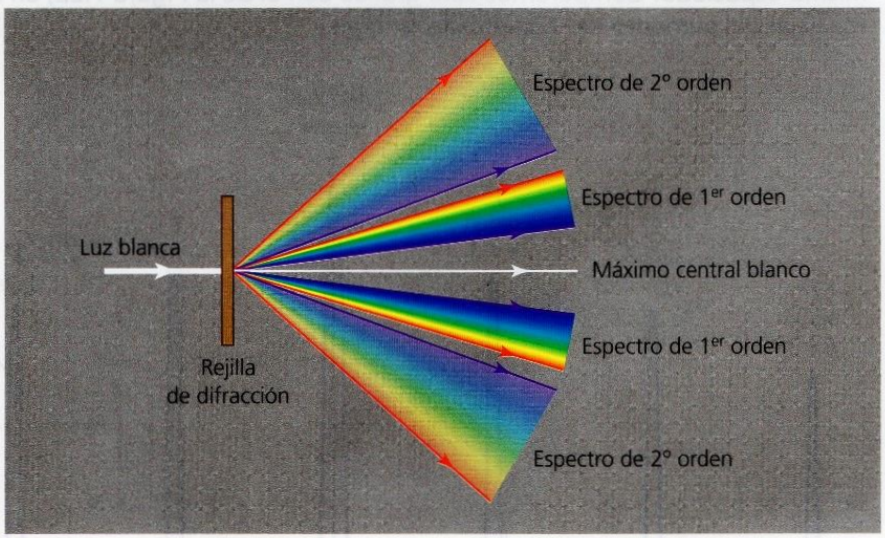
Figura 9.29
Alta resolución producida por rejillas de difracción



Las rejillas de difracción analizan los espectros mediante la separación (resolución) de los máximos de diversas longitudes de onda. Esto último se muestra en la Figura 9.29, en la que se comparan las intensidades de los espectros de primer orden obtenidos con rendija doble y con una rejilla de difracción (para un espectro que solo contiene luz roja y luz azul).

La luz blanca incidente sobre la rejilla produce una serie de espectros continuos, tal como se puede ver en la Figura 9.30. Como la longitud de onda de la luz roja es menor que el doble de la longitud de onda de la luz violeta, los espectros visibles de primer orden y de segundo orden no se pueden superponer, aunque los de órdenes superiores sí pueden.

Figura 9.30
Luz blanca atravesando una rejilla de difracción



Si estamos observando el espectro de emisión o de absorción de una sustancia, el uso de una rejilla de buena calidad permite resolver (separar) las longitudes de onda en las distintas «líneas» de un espectro de líneas, como los de la Figura 7.2 (página 283).

Las rejillas de difracción que hemos estudiado hasta ahora son todas de *transmisión*, pero se pueden aplicar principios similares a la luz *reflejada* por una serie de ranuras muy próximas. Las rejillas de reflexión pueden ser de utilidad cuando analizamos la radiación que, de otro modo, sería absorbida por el material de una rejilla de transmisión, por ejemplo la radiación ultravioleta. La fabricación de discos ópticos de almacenamiento de datos (por ejemplo, los DVD) produce una re-

gularidad en la estructura que los hace actuar como si fueran rejillas de reflexión. Los colores que observamos en las reflexiones sobre su superficie son consecuencia de este «efecto rejilla de difracción».

33 Un haz de luz de longitud de onda 460 nm incide normalmente sobre una rejilla de difracción con 200 ranuras por milímetro. Calcula el ángulo respecto a la normal del máximo de tercer orden.

34 Se utiliza una rejilla de difracción con luz monocromática de longitud de onda $6{,}3 \times 10^{-7}$ m y una pantalla situada perpendicularmente a una distancia de 3,75 m. ¿Cuántas ranuras por milímetro contiene la rejilla si produce un máximo de segundo orden a 38 cm del centro del patrón?

35 Un haz de luz monocromática de longitud de onda 530 nm incide normalmente sobre una rejilla que contiene 750 ranuras mm^{-1}. El patrón de interferencia se observa sobre una pantalla que está a 1,8 m de la rejilla. ¿Cuál es la distancia entre el primer y el segundo orden vistos sobre la pantalla?

36 **a** Una profesora usa una rejilla de difracción de 300 ranuras mm^{-1} para mostrar a la clase un espectro de luz blanca y quiere que el espectro de primer orden tenga una amplitud de 10 cm. Estima la distancia necesaria entre la rejilla y la pantalla.

b También se puede emplear un prisma para producir un espectro. Explica por qué en un prisma la luz roja se refracta menos que la luz azul, pero se difracta más en una rejilla de difracción.

37 Un haz de luz de longitud de onda $5{,}9 \times 10^{-7}$ m incide sobre una rejilla que contiene $6{,}0 \times 10^{5}$ ranuras por metro. ¿Cuántos órdenes se producen?

38 Explica por qué la luz roja del espectro de segundo orden se solapa con la luz azul del espectro de tercer orden cuando se usa luz blanca.

39 Se envía un máximo de segundo orden de luz azul de longitud de onda 460 nm hacia un determinado punto sobre una pantalla mediante una rejilla de difracción. En el mismo punto se detecta un máximo de tercer orden procedente de una longitud de onda distinta.

a ¿Cuál es la longitud de onda de la segunda radiación?

b ¿En qué zona del espectro electromagnético se encuentra esta radiación?

c Sugiere cómo se podría detectar.

40 En el desarrollo de la teoría de este apartado se ha supuesto que la luz incide normalmente sobre la rejilla de difracción. Sugiere cuál sería el efecto sobre el patrón observado de un giro de la rejilla de difracción de manera que la luz incidiera de forma oblicua.

41 Sugiere dos motivos por los que una rejilla de difracción óptica no sería de mucha utilidad en el caso de rayos X.

42 Esboza una gráfica en la que se represente la intensidad relativa en función de sen θ para una luz monocromática de longitud de onda 680 nm que incide normalmente sobre una rendija de difracción que contiene 400 ranuras por mm.

43 Una rejilla de difracción produce dos máximos de primer orden para distintas longitudes de onda a ángulos de 7,46° y 7,59°, respectivamente, con respecto a la normal que atraviesa la rejilla. Esta separación angular no es suficiente para ver las dos líneas por separado. ¿Cuál es la separación de las mismas líneas en el segundo orden?

44 **a** Esboza una gráfica de la variación de la intensidad relativa respecto al sen θ para la luz roja que atraviesa una rejilla de difracción que produce dos órdenes.

b Utiliza las gráficas que has esbozado para explicar la utilidad de las rejillas de difracción en el análisis de la luz.

c Esboza otra gráfica en la que se representen las intensidades relativas de las mismas luces roja y azul después de atravesar diez rendijas (con el mismo espaciado que la rejilla).

d Utiliza las gráficas que has esbozado para explicar la utilidad de las rejillas de difracción en el análisis de la luz.

Interferencias en láminas delgadas (películas finas)

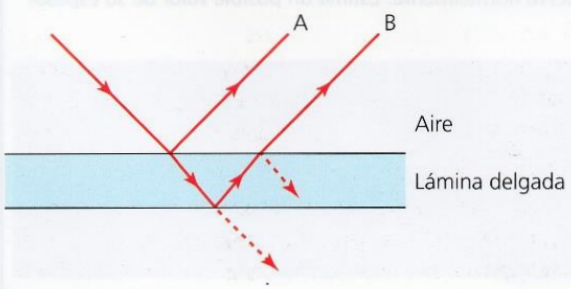


Figura 9.31
Ondas reflejadas sobre dos superficies de una lámina delgada

Sabemos que para que se produzca un patrón de interferencias es necesario que las ondas de luz sean *coherentes*, y el uso de láminas delgadas (o películas finas) es otra forma de obtenerlas. (La palabra «lámina» se utiliza en el sentido de capa delgada). Los rayos de luz de la Figura 9.31 son una representación simplificada de las ondas que se reflejan en la superficie anterior y posterior de una lámina delgada de un material transparente que podría ser, por ejemplo, agua o petróleo.

Si la lámina es lo bastante delgada, los rayos A y B serán coherentes (porque proceden del mismo frente de onda) y producirán efectos de interferencia en función de su diferencia de trayectoria. Si la lámina no es lo bastante delgada, las ondas perderán su coherencia y no se observará ningún patrón de interferencia.

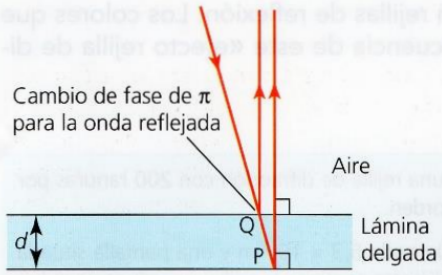


Figura 9.32
Cuando se pasa del aire a la lámina hay un cambio de fase

Ecuaciones para la interferencia en el caso de incidencia normal sobre una lámina paralela

En la Figura 9.32 se muestran las ondas (representadas por rayos), inicialmente en el aire, *reflejadas normalmente* por las dos superficies de una lámina con forma de paralelepípedo de espesor *d*. Los rayos se han representado ligeramente inclinados respecto a la perpendicular solo para poderlos distinguir con claridad. Sabemos que la condición habitual para que se produzca una interferencia constructiva es que la diferencia de trayectoria sea un número entero de longitudes de onda, pero siempre que hay reflexiones necesitamos también tener en cuenta si existe algún *cambio de fase*.

Habrá un cambio de fase de $\lambda/2$ (π radianes) en el punto Q, donde la luz que viaja en el aire se refleja en un medio con un índice de refracción, *n*, mayor. Este fenómeno se estudió brevemente en el Capítulo 4. Supondremos que el índice de refracción del medio situado al otro lado de la lámina delgada es menor que el de la propia lámina, de manera que no habrá cambio de fase en P, en la segunda frontera. Este supuesto es válido para los dos ejemplos más frecuentes de interferencias en láminas delgadas: aire/agua y aire/petróleo/agua.

Como consecuencia de la introducción de una diferencia de trayectoria de $\lambda/2$ (debida al cambio de fase), la condición para la interferencia constructiva pasa de ser diferencia de trayectoria = $m\lambda$ a diferencia de trayectoria = $(m + ½)\lambda$. (Utilizamos ahora el símbolo *m* para representar un número entero para evitar confusiones con *n*, que se utiliza para el índice de refracción).

En el interior de la lámina la longitud de onda de la luz será menor. Por ejemplo, el índice de refracción del agua es 1,33, lo que significa que la velocidad de la luz en agua es $c/1{,}33$ y por tanto la longitud de onda se reduce a $\lambda/1{,}33$. Así, la longitud de onda que se introduce en la ecuación se debe dividir entre el índice de refracción, y las condiciones para la interferencia se convierten en las siguientes:

Interferencia constructiva:

$$2dn = (m + ½)\lambda$$

Interferencia destructiva:

$$2dn = m\lambda$$

Estas ecuaciones, que solo se aplican en el caso de incidencia normal sobre determinadas láminas paralelas, figuran en el *Apéndice de datos de Física*.

Ejemplos de interferencias en láminas delgadas

Determinación del espesor de una lámina (o película)

Las películas de petróleo y las pompas de jabón son por lo general muy finas, comparables a la longitud de onda de la luz, y se puede determinar su espesor mediante la observación de los fenómenos de interferencia que tienen lugar. Como son muy finas, podemos suponer que el valor de *m* para la ecuación anterior es igual a uno y, por tanto, se puede estimar el espesor, *d*, de la lámina o película a partir de la longitud de onda y del índice de refracción.

Ejemplo resuelto

8 Una película de petróleo se ve de color azul cuando se observa normalmente. Estima un posible valor de su espesor si el índice de refracción del petróleo es 1,57.

Para una interferencia constructiva:

$$2dn = (m + ½)\lambda$$

con $m = 0$ y $\lambda = 4{,}7 \times 10^{-7}$ m.

$$2 \times d \times 1{,}57 = 0{,}5 \times (4{,}7 \times 10^{-7})$$

$$d = 7{,}5 \times 10^{-8}\,\text{m}$$

Aplicaciones

Cuantificación de los vertidos de petróleo

El enorme consumo de energía que comporta el estilo de vida moderno requiere un suministro continuo de petróleo (véase Capítulo 8). La extracción de petróleo del suelo oceánico, su traslado a tierra firme y su distribución por todo el planeta mediante petroleros y oleoductos ha ocasionado un gran número de accidentes. La consecuencia es la considerable contaminación de los mares, así como de las plantas y los animales que viven en su interior y alrededores. En la Figura 9.33 se muestra un pingüino cubierto de petróleo procedente de un vertido en la costa de Tauranga (Nueva Zelanda) en 2011.



Figura 9.33
Efectos de un vertido de petróleo sobre la vida marina

El petróleo es menos denso que el agua y, por tanto, flota sobre la superficie del mar. Un vertido de petróleo puede ser difícil de contener porque tiende a dispersarse formando películas finas sobre la superficie del agua (con una extensión que depende del tipo de petróleo). El término *mancha de petróleo* se utiliza a veces para describir una fina película de petróleo que se ha extendido a lo largo de una superficie grande y que no se ha roto por la acción de las olas.

Un vertido de petróleo de unos 1000 litros que se ha derramado hasta recubrir una superficie de un kilómetro cuadrado tiene un espesor de unos 10^{-3} mm y se detecta por los patrones de interferencia coloreados que produce. Una película de petróleo cuyo espesor fuera la décima parte del anterior tendría un aspecto brillante. Un vertido de mayor espesor tendría un aspecto más oscuro, sin colores. A menudo es posible estimar el volumen de un vertido de petróleo a partir de la superficie que ocupa y de su aspecto.

La gravedad de la posible contaminación que sigue a un vertido de petróleo depende indudablemente de la cantidad de petróleo derramado al medio ambiente y de la ubicación del vertido, pero hay otros muchos factores relacionados, entre los que se encuentran el tipo de petróleo, las condiciones meteorológicas, las corrientes y las olas. La temperatura del agua también puede ser un factor importante.

1 Investiga cuáles son los diversos métodos que se pueden emplear para contener y limpiar un vertido de petróleo grande en la superficie marina.

Recubrimientos antirreflectantes

Consideremos una superficie de vidrio con una lámina delgada de material transparente en la parte superior («recubrimiento»), tal como se muestra en la Figura 9.34. El material con el que está fabricada la lámina tiene un índice de refracción menor que el del vidrio. La luz incidente es monocromática, con longitud de onda λ, e incide normalmente, aunque en el diagrama se ha representado un poco inclinada para que se puedan distinguir los diversos rayos.

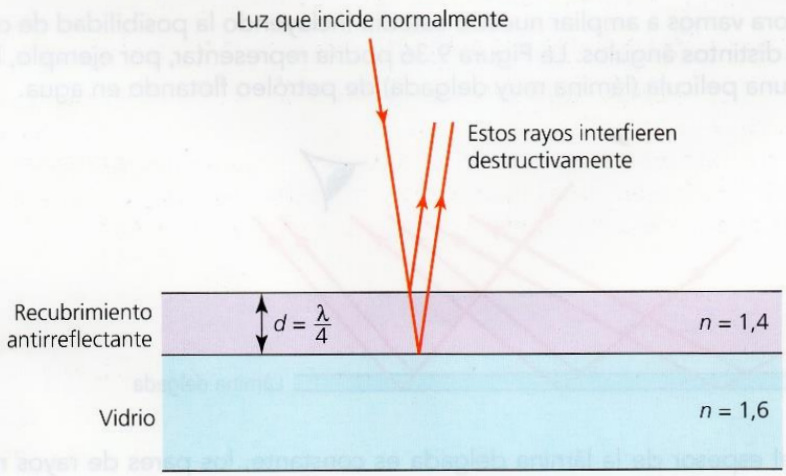


Figura 9.34
Reflexiones en un recubrimiento antirreflectante

Como ambas reflexiones tienen lugar cuando la luz entra en un medio con un índice de refracción mayor, no necesitamos considerar el efecto de los cambios de fase asociados. La condición mínima para que haya una interferencia destructiva es:

$$\text{diferencia de trayectoria} = 2d = \tfrac{1}{2}\lambda_c$$

donde λ_c es la longitud de onda en el recubrimiento (no en aire), o:

$$d = \frac{\lambda_c}{4}$$

Un recubrimiento antirreflectante debe tener un espesor equivalente a un cuarto de longitud de onda (medida en el recubrimiento, no en aire).

Alternativamente, como $\lambda_c = \lambda/n$, donde λ es la longitud de onda en aire:

$$d = \frac{\lambda}{4n}$$

Si la luz no se refleja, se transmite más energía útil a través del vidrio. El uso de lentes con recubrimiento antirreflectante en todo tipo de instrumentos ópticos (incluyendo cristales para gafas), además de pilas solares y paneles solares, permite asegurar que se transmite la mayor intensidad de luz posible. El proceso consistente en la aplicación de un recubrimiento antirreflectante a una lente se denomina en inglés *blooming* y se puede traducir como **hiperiluminación de la imagen**.



Figura 9.35
Avión Stealth

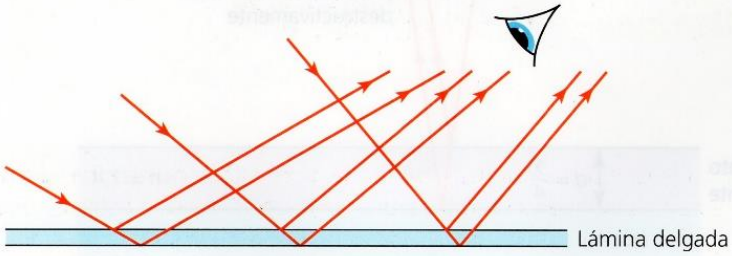
El espesor de una única capa da lugar a una interferencia completamente destructiva para una longitud de onda determinada, pero las demás longitudes de onda también experimentan una interferencia, hasta cierto punto, destructiva. El uso de varios recubrimientos de distintos espesores o distintos índices de refracción, permite reducir de forma efectiva las reflexiones sobre todas las longitudes de onda visibles. Estos efectos también dependen del ángulo de incidencia, pero en la mayoría de ocasiones las lentes se utilizan con luz que incide aproximadamente normalmente.

Los recubrimientos antirreflectantes también se emplean en los aviones militares con el objetivo de evitar la detección por parte de los radares, que utilizan diversas longitudes de onda, habitualmente de unos pocos centímetros. En la Figura 9.35 podemos ver un avión Stealth («avión furtivo»), que utiliza diversas técnicas para evitar su detección.

Interferencia en ángulos oblicuos

Ahora vamos a ampliar nuestro estudio incluyendo la posibilidad de observar láminas delgadas desde distintos ángulos. La Figura 9.36 podría representar, por ejemplo, las reflexiones producidas sobre una película (lámina muy delgada) de petróleo flotando en agua.

Figura 9.36
Observación de una lámina delgada (o película) a distintos ángulos



Si el espesor de la lámina delgada es constante, los pares de rayos reflejados procedentes de cada uno de los tres rayos incidentes del diagrama no tienen las mismas diferencias de trayectoria, y eso significa que se producen interferencias constructivas para distintas longitudes de onda a distintos ángulos. El ojo ve distintos colores según qué zona de la película de petróleo esté mirando.

En la Figura 9.37 se muestra el aspecto típico de una película de petróleo sobre agua. Normalmente no hay regularidad en los patrones observados porque el espesor de la película no es constante. Se pueden observar efectos similares sobre pompas de jabón (Figura 9.38), pero su aspecto cambia rápidamente a medida que el agua se desplaza hacia la parte inferior de la pompa como consecuencia de la gravedad y la rápida evaporación del agua.

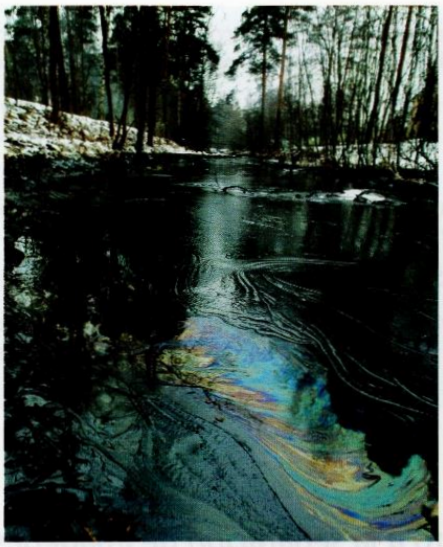


Figura 9.37
Película muy fina de petróleo sobre agua

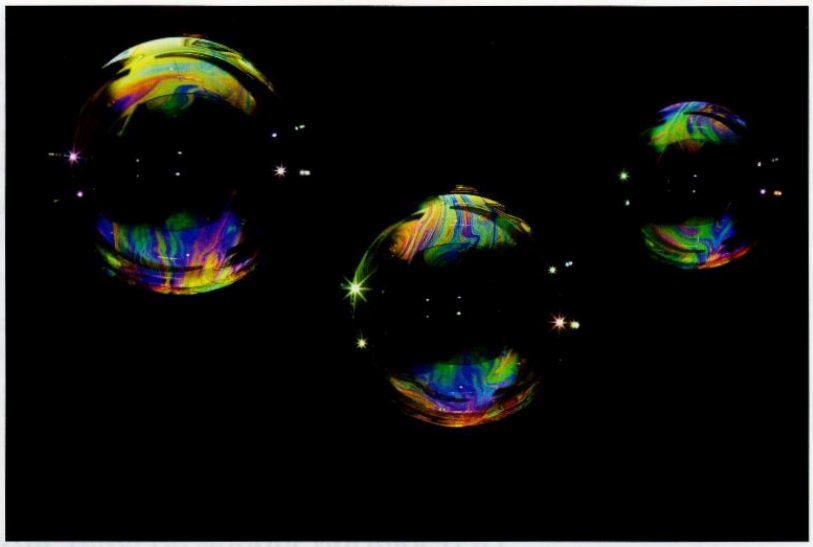


Figura 9.38
Efectos de las interferencias en pompas de jabón

Los efectos de color que se observan sobre las plumas de algunos pájaros y las alas de algunos insectos, las denominadas **iridiscencias** (Figura 9.39), desconcertaron a los primeros científicos. Actualmente sabemos que se trata de un efecto de interferencia causado por las estructuras de las superficies.

Figura 9.39
Iridiscencias en las plumas de un pavo real.



Naturaleza de la ciencia

Curiosidad y serendipia

La belleza de la iridiscencia es fácilmente apreciable por todos, de manera que no es sorprendente que estimulara la búsqueda de una explicación y el posterior desarrollo de la teoría de las láminas delgadas (o películas). La curiosidad natural de los seres humanos es una importante fuerza directriz en ciencia, y muchos científicos ven belleza e inspiración en los fenómenos inexplicados de todo tipo. Sin embargo, hay muchos ejemplos de estudios científicos que condujeron a resultados sorprendentes.

El término **serendipia** se utiliza para describir un hallazgo valioso que se produce de manera accidental o casual. La primera producción de láminas delgadas en un laboratorio fue un ejemplo de serendipia que tuvo lugar mientras Joseph Fraunhofer observaba el efecto del tratamiento de una superficie de vidrio con ácido nítrico.

45 Se observa una película de petróleo mediante luz que incide normalmente con una longitud de onda de 624 nm. Si el índice de refracción del petróleo es 1,42, ¿cuál es el espesor mínimo que producirá una interferencia constructiva?

46 Se observa una lámina de plástico transparente con índice de refracción 1,51 usando luz visible monocromática que incide normalmente. Si se produce una interferencia destructiva cuando el espesor de la lámina es $4{,}58 \times 10^{-7}$ m, calcula los posibles valores de la longitud de onda.

47 El recubrimiento antirreflectante de una lente tiene un espesor de $8{,}3 \times 10^{-5}$ mm. ¿Cuál es el índice de refracción aproximado si el recubrimiento está diseñado para ser antirreflectante para la luz azul?

48 Investiga cuáles son los diversos sistemas anti-detección que emplean los aviones militares.

49 La ecuación $2dn = m\lambda$ se puede utilizar para determinar el espesor de una lámina delgada que da lugar a una interferencia destructiva. Pon dos ejemplos de observación con láminas delgadas para los que no sería adecuado el uso de esta ecuación.

9.4 Resolución

La resolución supone un límite absoluto a la separación de imágenes de objetos que puede alcanzar un sistema óptico u otro tipo de sistema

Importancia del tamaño de la abertura de difracción

Si estás en la playa y observas la arena, probablemente no serás capaz de distinguir los granos. Y, análogamente, si observas un árbol a lo lejos, lo más seguro es que no puedas distinguir las hojas. En términos científicos decimos que no puedes **resolver** los detalles.

Suponiendo que una persona tenga buena vista, la capacidad de sus ojos para resolver los detalles depende en gran medida de la difracción de la luz que entra a través de la *pupila* (abertura) y de la separación de los receptores de luz que hay en la *retina* del ojo. Cuanto mayor es la abertura, menor es la difracción y, por tanto, mejor es la resolución. Podemos someterla a prueba mirando a través de un *pequeño* orificio practicado en un trozo de papel que nos ponemos delante del ojo (de manera que aumenta la difracción de la luz que entra).

Para entender mejor el concepto de resolución se suele simplificar el escenario considerando únicamente ondas con una sola longitud de onda que provienen de dos fuentes puntuales de luz idénticas.

Resolución en sistemas de dos fuentes monocromáticas simples

En la Figura 9.40 se representa un ojo que observa dos objetos puntuales, O_1 y O_2, alejados; el ángulo θ se denomina **separación angular** de los objetos. (A veces se denomina también *ángulo subtendido* por el ojo).

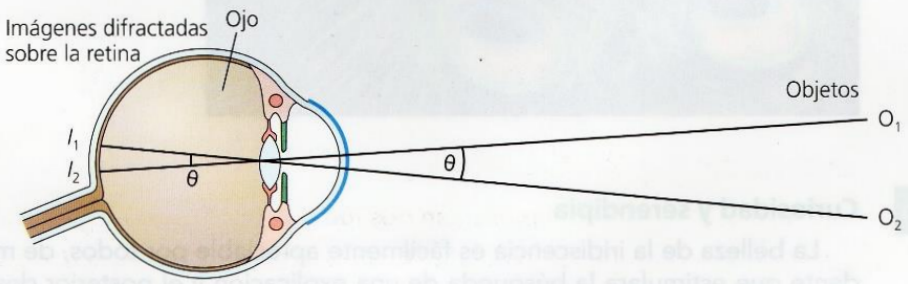


Figura 9.40
Un ojo recibe luz procedente de dos objetos separados

La luz procedente de cada objeto se difracta cuando entra por el ojo, y los receptores de luz situados en la retina, en el fondo del ojo, reciben dos patrones de difracción por rendija simple. Por tanto, los objetos puntuales no forman imágenes puntuales. (Observemos que en este ejemplo no se representan los rayos de luz refractados por el ojo porque pasan a través del centro óptico de las lentes).

La capacidad del ojo para resolver dos imágenes separadas depende de cuánto se superpongan los patrones de difracción (suponiendo que los receptores de la retina estén lo bastante próximos). Lo mismo podemos decir para cualquier instrumento diseñado para formar imágenes, como un telescopio, un microscopio o una cámara.

Consideremos la Figura 9.41, en la que se representan las intensidades procedentes de dos fuentes idénticas que podrían ser recibidas por un ojo, u otro sistema cualquiera de formación de

imágenes. En la Figura 9.41a las dos fuentes se pueden resolver fácilmente porque sus patrones de difracción no se superponen. En la Figura 9.41c las fuentes están tan próximas que sus patrones de difracción se mezclan y el ojo no puede detectar ninguna bajada en la intensidad resultante, de manera que las imágenes no se resuelven. La forma de onda resultante no se representa, pero se puede determinar mediante el principio de superposición.

En la Figura 9.41b se representa la situación en la que las dos fuentes apenas se resuelven porque, aunque las imágenes están cerca, aún existe una bajada detectable en la intensidad resultante.

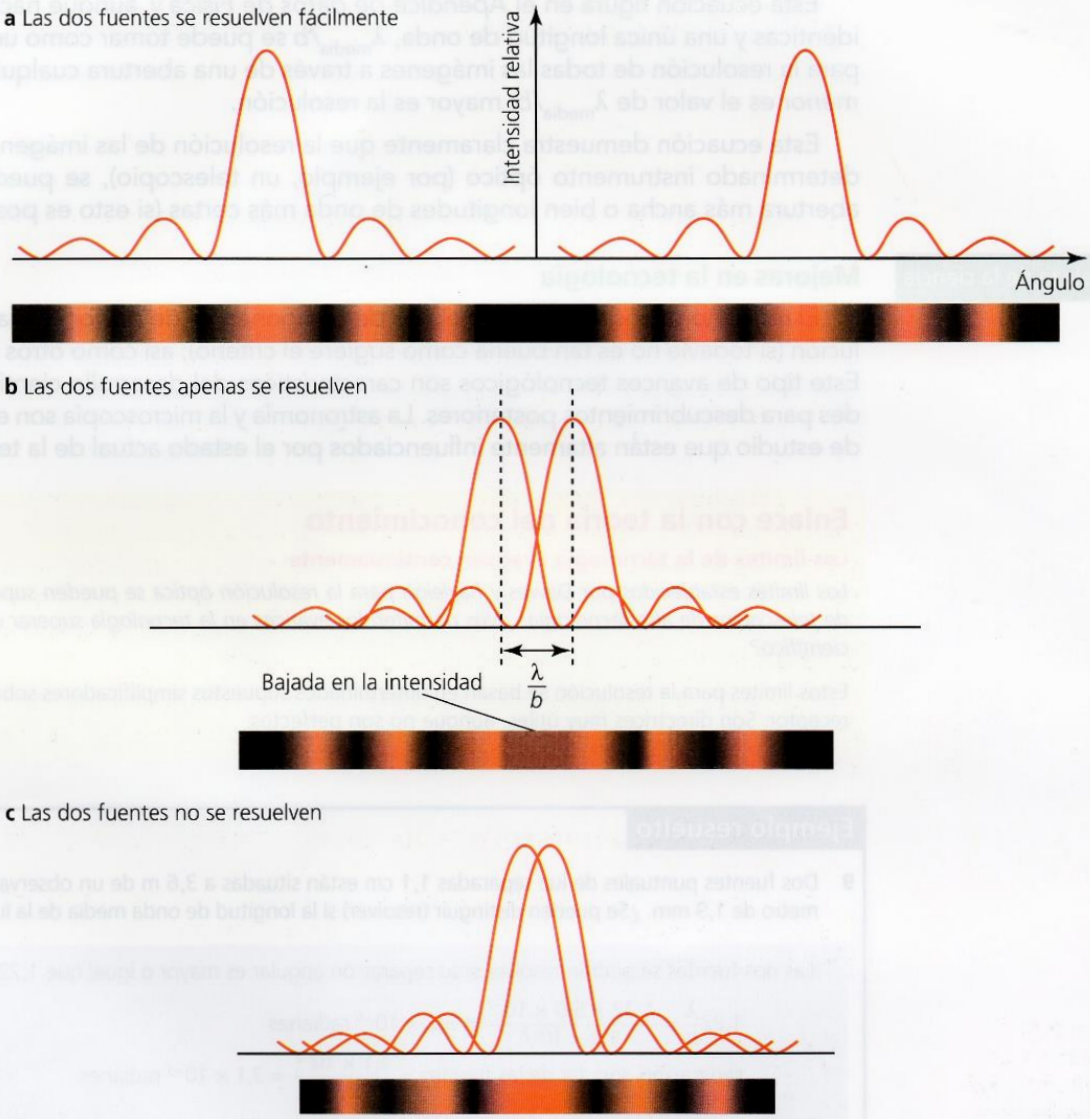


Figura 9.41
Intensidades recibidas por el ojo como resultado de dos patrones de difracción

Criterio de Rayleigh

En la Figura 9.42a se representan dos fuentes puntuales vistas a través de aberturas circulares.

El **criterio de Rayleigh** (similar al *límite de Dawes*) afirma que dos fuentes puntuales *se empiezan* a resolver cuando el primer mínimo del patrón de difracción de una de las fuentes se produce en el mismo ángulo que el máximo central de la otra fuente (Figuras 9.41b y 9.42b).

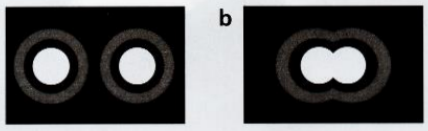


Figura 9.42
Imágenes de dos fuentes puntuales observadas a través de aberturas circulares que son **a** *resolubles fácilmente* **b** *apenas resolubles*

El criterio de Rayleigh es una guía útil pero no es una *ley* física, porque puede haber otros factores además de la difracción que pueden afectar a la resolución, de manera que debe verse como un límite de esta. Este criterio se puede expresar matemáticamente tal como veremos a continuación.

Las imágenes de dos fuentes *se empiezan* a resolver a través de una *rendija estrecha* de anchura b cuando la separación angular es $\theta = \lambda/b$.

Las imágenes de las fuentes se podrán resolver solo cuando el ángulo subtendido sea mayor que θ.

Cuando hablamos de ojos, telescopios y microscopios está claro que las ondas de luz se suelen recibir y detectar mediante aberturas circulares, no mediante rendijas. La resolución de una abertura circular de diámetro b no es tan buena como la de una rendija de anchura fija b, de modo que en este caso el criterio se debe enunciar del modo siguiente:

Las imágenes de dos fuentes a través de una abertura circular se pueden empezar a resolver cuando la separación angular es $\theta = 1{,}22\ \lambda/b$.

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física* y, aunque hace referencia a dos fuentes idénticas y una única longitud de onda, λ_{media}/b se puede tomar como un buen valor de referencia para la resolución de todas las imágenes a través de una abertura cualquiera de anchura b. Cuanto *menor* es el valor de λ_{media}/b, mayor es la resolución.

Esta ecuación demuestra claramente que la resolución de las imágenes proporcionadas por un determinado instrumento óptico (por ejemplo, un telescopio), se puede mejorar utilizando una abertura más ancha o bien longitudes de onda más cortas (si esto es posible).

Naturaleza de la ciencia

Mejoras en la tecnología

El rediseño de los equipos y/o el uso de componentes de mayor calidad pueden mejorar la resolución (si todavía no es tan buena como sugiere el criterio), así como otros aspectos de las imágenes. Este tipo de avances tecnológicos son característicos del desarrollo científico y ofrecen oportunidades para descubrimientos posteriores. La astronomía y la microscopía son ejemplos claros de ámbitos de estudio que están altamente influenciados por el estado actual de la tecnología.

Enlace con la teoría del conocimiento

Los límites de la tecnología avanzan continuamente

Los límites establecidos por Dawes y Rayleigh para la resolución óptica se pueden superar mediante la construcción de telescopios de alta tecnología. ¿Nos permiten los avances en la tecnología superar otros límites del conocimiento científico?

Estos límites para la resolución se basan en determinados supuestos simplificadores sobre las fuentes, la radiación y el receptor. Son directrices muy útiles, aunque no son perfectas.

Ejemplo resuelto

9 Dos fuentes puntuales de luz separadas 1,1 cm están situadas a 3,6 m de un observador cuya pupila tiene un diámetro de 1,9 mm. ¿Se pueden distinguir (resolver) si la longitud de onda media de la luz empleada es $5{,}0 \times 10^{-7}$ m?

Las dos fuentes se podrán resolver si su separación angular es mayor o igual que $1{,}22\ \lambda/b$.

$$1{,}22\frac{\lambda}{b} = \frac{1{,}22 \times 5{,}0 \times 10^{-7}}{1{,}9 \times 10^{-3}} = 3{,}2 \times 10^{-4} \text{ radianes}$$

$$\text{separación angular de las fuentes} = \frac{1{,}1 \times 10^{-2}}{3{,}6} = 3{,}1 \times 10^{-3} \text{ radianes}$$

La separación angular es mucho mayor que $1{,}22\ \lambda/b$, por tanto se podrán resolver fácilmente.

Otros ejemplos de resolución

Radiotelescopios

Las estrellas emiten muchos otros tipos de radiación electromagnética además de la luz y los infrarrojos. Los radiotelescopios, como el de la Figura 9.43, detectan longitudes de onda mucho mayores que la luz visible y, por tanto, tendrían muy mala resolución si no fuera porque se construyen con diámetros muy grandes.



Figura 9.43
Radiotelescopio de Jodrell Bank en Inglaterra (Reino Unido)

Ejemplo resuelto

10 a El radiotelescopio británico de Jodrell Bank tiene un diámetro de 76 m. Si se utilizan ondas de radio de longitud de onda 21 cm, ¿puede resolver las imágenes de dos estrellas separadas $2,7 \times 10^{11}$ m y que están a $1,23 \times 10^{16}$ m de la Tierra?

b Compara el poder de resolución de este radiotelescopio con el de un ojo humano típico.

a $1,22\frac{\lambda}{b} = \frac{1,22 \times 21 \times 10^{-2}}{76} = 3,4 \times 10^{-3}$ radianes

La separación angular es mucho menor que $= \frac{2,7 \times 10^{11}}{1,23 \times 10^{16}} = 2,2 \times 10^{-5}$ radianes

La separación angular es mucho menor que $1,22\lambda/b$, por tanto las imágenes no se pueden resolver y veremos una sola estrella.

b Si utilizamos los datos del Ejemplo resuelto 9 como ejemplo concreto, vemos que un ojo humano puede resolver dos objetos si su separación angular es de unos 3×10^{-4} radianes o más, pero el radiotelescopio de esta pregunta requiere que los objetos estén separados al menos $3,4 \times 10^{-3}$ radianes. Estamos hablando de un ángulo unas diez veces mayor. El ojo tiene una resolución mucho mayor que un radiotelescopio principalmente porque utiliza ondas con longitud de onda mucho menor. Se puede mejorar la resolución de los radiotelescopios construyéndolos todavía más grandes, pero existen unos límites en cuanto al tamaño de construcción que se puede alcanzar.

Aplicaciones

Más sobre radiotelescopios

A pesar de tener peor resolución (comparada con el ojo humano), los radiotelescopios recogen mucha información sobre el universo que no se podría obtener a partir de la luz visible. Las ondas de luz procedentes de las estrellas lejanas se ven afectadas por la atmósfera terrestre dando lugar a una disminución de la posible resolución. Esta es la razón por la cual los telescopios ópticos se suelen construir en cimas de montañas, o incluso sobre satélites en órbita. Los radiotelescopios, en cambio, no tienen este problema.

El hidrógeno es el elemento químico más abundante en el universo y sus átomos emiten ondas electromagnéticas de longitud de onda 21 cm, en la zona del espectro electromagnético denominada ondas de radio. En la Tierra se reciben otras muchas longitudes de onda similares (desde unos pocos centímetros hasta muchos metros) procedentes del espacio exterior y los radiotelescopios están diseñados para detectarlas.

En un radiotelescopio de plato, como el de la Figura 9.43, las ondas de radio se reflejan en un reflector parabólico y se enfocan en un receptor central (como en un telescopio óptico de reflexión). Como hemos visto, la resolución de un radiotelescopio es mala a menos que el diámetro del plato (la abertura) sea muy grande. El hecho de tener una abertura grande significa, indudablemente, que el telescopio puede detectar objetos más tenues y más distantes porque la energía que se recibe es mayor gracias a que el plato es también mayor.

Existen muchos diseños distintos de radiotelescopios, pero el mayor construido con un solo plato es el de Arecibo, en Puerto Rico, (diámetro 305 m), que utiliza una depresión natural del terreno como soporte. No obstante, en China se está construyendo un radiotelescopio con un diámetro de 500 m que se espera que entre en funcionamiento en 2016.



Figura 9.44
Una red de radiotelescopios conectados

En la interferometría con ondas de radio (radiointerferometría), los radiotelescopios se agrupan según una distribución regular (una *formación*, como en la Figura 9.44), y las señales recibidas en los distintos telescopios se combinan para producir un patrón de superposición (interferencia) cuyo espaciado es mucho más estrecho que el patrón de difracción de cada telescopio individual. Esta distribución en red mejora de forma notable la resolución del sistema.

1 Obtén información sobre el radiotelescopio chino *FAST*.

Pantallas digitales

Las imágenes digitales están compuestas por un gran número de diminutos elementos de imagen (*píxeles*), y la información sobre la pantalla normalmente se da en una forma del tipo 1366 x 768, que significa que hay 1366 píxeles en cada fila horizontal y 768 píxeles en cada fila vertical, lo que hace un total de 1 049 088 píxeles, o aproximadamente un megapíxel (1MPx).

Si el tamaño de la pantalla es 41 cm por 23 cm, los centros de los píxeles están separados 0,03 cm en promedio en las filas y columnas. Los espacios entre los píxeles son mucho menores. (El número de píxeles se suele denominar erróneamente «resolución» de la pantalla).

Cuando miramos las imágenes de una pantalla no deseamos ver los píxeles individuales, de modo que la separación angular vista por el observador debe ser menor que $1{,}22\lambda/b$. Si utilizamos el valor $4{,}0 \times 10^{-7}$ m como el de la menor longitud de onda producida por la pantalla, podemos obtener una regla práctica para calcular la distancia mínima a la que se debe situar el observador (con un tamaño de pupila de 2 mm) para no resolver (distinguir) los píxeles individuales:

$$\frac{1{,}22 \times 4{,}0 \times 10^{-7}}{2 \times 10^{-3}} = \frac{\text{separación entre píxeles}}{\text{distancia mínima entre el observador y la pantalla}}$$

Una separación entre píxeles de 0,03 mm proporciona una distancia mínima de visionado de unos 10 cm. Las pantallas de televisión diseñadas para verse desde más lejos pueden tener los elementos de imagen más separados.

Cámaras digitales

Los factores más importantes en la determinación de la calidad de las imágenes obtenidas con una cámara son la calidad y el tamaño de las lentes, y la apertura del diafragma. En las cámaras digitales lo importante es que la distancia entre los receptores (CCD) de los sensores de imagen sea lo bastante pequeña como para resolver el detalle que ofrecen las lentes. La «resolución» de una cámara digital también se describe en términos del número de píxeles (receptores de luz). El grado de detalle con el que se ve la imagen final obtenida con una cámara digital depende de diversos factores, como la configuración de la cámara, el tipo de procesamiento de datos y la «resolución» de la pantalla.

Almacenamiento óptico de datos

La información se almacena utilizando diminutas protuberancias (denominadas «áreas») sobre un disco de plástico (CD o DVD). La información es «leída» por un láser que se refleja sobre el recubrimiento reflectante de las áreas y/o los «surcos» que hay entre ellas.

Cuanto más próximas estén entre sí las áreas (y los surcos), mayor es la cantidad de información que se puede almacenar en el disco. Sin embargo, si las áreas están *demasiado* próximas, el haz láser difractante no puede resolver la diferencia entre ellas. Un láser con una menor longitud de onda es menos difractante y permite que se almacenen más datos en un disco del mismo tamaño.

Los surcos de un CD convencional (que almacena 700 MB de información) tienen una longitud de unos 8×10^{-6} m, y son leídos por luz procedente de un láser con una longitud de onda de $7{,}8 \times 10^{-7}$ m. Los DVD almacenan información de la misma manera, pero tienen una mayor capacidad: los surcos y las áreas pueden estar más próximos entre sí porque se utiliza una luz láser con una longitud de onda menor ($6{,}5 \times 10^{-7}$ m). Un DVD de una sola capa puede almacenar aproximadamente siete veces más información que un CD.

El desarrollo de los láseres azules, con menores longitudes de onda ($4{,}05 \times 10^{-7}$ m), ha dado lugar a la tecnología Blu-ray y ha incrementado enormemente la capacidad de almacenamiento de datos en discos del mismo tamaño, lo que permite grabar y reproducir vídeos de alta definición (HD).

Satélites

Los satélites se utilizan en ámbitos cada vez más variados, como las comunicaciones, la televisión, la elaboración de mapas, el espionaje, la observación del clima, la predicción meteorológica, el uso de tierras y la investigación astronómica. En un principio, el lanzamiento y el uso de los satélites estuvo bajo control militar y gubernamental, pero su uso con fines comerciales es cada vez más importante y generalizado. Para ello se requieren reuniones internacionales y acuerdos sobre su lanzamiento, las ubicaciones de sus órbitas y el uso selectivo de frecuencias de microondas.

La comunicación entre los satélites y las emisoras terrestres requiere el uso de ondas que no se vean afectadas por la atmósfera al atravesarla. Normalmente se emplean microondas con una longitud de onda de unos pocos centímetros. Los reflectores parabólicos situados detrás de las antenas *transmisoras* pueden producir haces muy direccionados, siempre que se pueda limitar la difracción mediante el uso de una abertura lo suficientemente grande.

Las antenas *receptoras* están diseñadas de forma análoga, con reflectores que enfocan las microondas entrantes sobre la antena. Tienen que ser lo bastante grandes como para recoger una señal con la potencia suficiente.

Actualmente hay más de 1000 satélites operativos en órbita alrededor de la Tierra y se estima que en los próximos años se lanzarán 100 nuevos satélites cada año. Con tal cantidad de transmisiones a la vez, es muy importante que las antenas receptoras puedan resolver la señal que se desea detectar entre las diversas señales cercanas.

Ejemplo resuelto

11 El diámetro de una antena transmisora es 5,0 m y transmite un haz de microondas de frecuencia 4,8 GHz. ¿Cuál es el área transversal aproximada del haz de difracción central a una distancia de 300 km de la antena (distancia habitual entre la Tierra y un satélite de órbita cercana a la Tierra)?

$$\text{longitud de onda} = \frac{v}{f} = \frac{3{,}0 \times 10^8}{4{,}8 \times 10^9} = 6{,}3 \times 10^{-2}\,\text{m}$$

Ángulo entre el primer mínimo de difracción y el centro del patrón de difracción:

$$\theta = \frac{\lambda}{b} = \frac{6{,}3 \times 10^{-2}}{5{,}0} = 0{,}0126$$

Radio del haz a una distancia de 300 km:

$$r = 0{,}0125 \times 3 \times 10^5 = 3\,780\,\text{m}$$

$$\text{área del haz} = \pi r^2 = 4{,}5 \times 10^7\,\text{m}^2\ (44\,\text{km}^2)$$

Resolución de una rejilla de difracción

El uso de las rejillas de difracción se ha estudiado anteriormente en este capítulo como un método para analizar la luz. Se puede considerar como otra forma de resolución: separar longitudes de onda en lugar de separar fuentes.

La capacidad de separar longitudes de onda de una rejilla se denomina **poder de resolución cromático**, R, y se define:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

Donde $\Delta\lambda$ es la menor diferencia entre dos longitudes de onda resolubles y λ es cualquier valor dado de la longitud de onda. Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*. Como es un cociente, el poder de resolución cromático no tiene unidades.

Ejemplo resuelto

12 ¿Cuál es el poder de resolución cromático de una rejilla de difracción que justo empieza a separar longitudes de onda de 589,00 nm y 589,59 nm?

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{589{,}59}{0{,}59} = 1{,}0 \times 10^3$$

Sin embargo, es más fácil determinar el poder de resolución cromático de una rejilla de difracción a partir del número de ranuras mm^{-1} y la anchura del haz de luz que incide sobre ella, de la manera siguiente:

$$R = mN$$

Donde N es el número total de rendijas iluminadas y m es el orden de difracción (la resolución es mejor para órdenes mayores). Esta ecuación también figura en el *Apéndice de datos de Física*. Observemos que, para una rejilla determinada, el incremento de la anchura del haz incidente produce a su vez un incremento del poder de resolución cromático (aumenta la resolución).

Ejemplo resuelto

13 Un haz de luz paralela de anchura 5 mm incide sobre una rejilla de difracción con 80 ranuras mm^{-1}. ¿Cuál es el poder de resolución cromático en el espectro de segundo orden?

$R = mN$

$R = 2 \times (5 \times 80) = 800$

50 **a** ¿Por qué podrías pensar que con una lente de mayor diámetro en una cámara obtendrías mejores fotografías?
b Sugiere un motivo por el que las lentes más grandes podrían dar lugar a imágenes peores.

51 ¿Por qué a veces los astrónomos prefieren tomar fotografías con filtros de color azul?

52 Las pupilas de nuestros ojos se dilatan (aumentan de tamaño) cuando la intensidad de la luz disminuye. Argumenta si esto significa que la gente ve mejor de noche.

53 Un coche se acerca a un observador de noche y desde una distancia lejana. Si los faros están separados 1,8 m, estima la máxima distancia a la que el observador verá dos faros distintos. (Supón que la longitud de onda media de la luz es $5{,}2 \times 10^{-7}$ m y el diámetro de la pupila es 4,2 mm).

54 Queremos que la cámara situada sobre un satélite que orbita a 230 km de altura sobre la superficie terrestre tome fotografías que resuelvan objetos separados 1,0 m. Suponiendo una longitud de onda de $5{,}5 \times 10^{-7}$ m, ¿cuál es el diámetro mínimo necesario de las lentes?

55 **a** Un radiotelescopio con un plato de diámetro 64 m se utiliza para detectar radiación de longitud de onda 1,4 m. ¿A qué distancia de la Tierra se encuentran dos estrellas separadas una distancia de $3{,}8 \times 10^{12}$ m que están en el límite de resolución del radiotelescopio?
b ¿Qué supuestos has tenido en cuenta?

56 ¿Se podría utilizar un telescopio óptico con una lente (objetivo) de diámetro 12 cm para leer lo que pone en un cartel publicitario que está a 5,4 km si las letras están separadas en promedio 8,5 cm? Razona tu respuesta.

57 La Luna está a $3{,}8 \times 10^{8}$ m de la Tierra. Estima cuál es la menor distancia entre dos elementos situados sobre la superficie de la Luna que permite distinguirlos desde la Tierra por el ojo humano.

58 Utiliza la Figura 9.45 para determinar la resolución de tus propios ojos.

59 **a** ¿Cuál es el poder de resolución cromático de segundo orden de una rejilla de difracción cuyas ranuras están separadas $3{,}3 \times 10^{-6}$ m para un haz incidente de anchura 1 mm?
b ¿Se podrían resolver con esta rejilla dos longitudes de onda de $6{,}22 \times 10^{-7}$ m y $6{,}23 \times 10^{-7}$ m respectivamente?
c ¿Cómo se podría aumentar la resolución utilizando la misma rejilla?

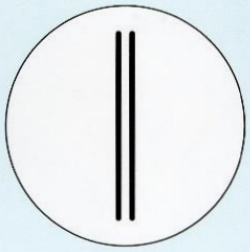


Figura 9.45

9.5 Efecto Doppler

El efecto Doppler describe el fenómeno del desplazamiento de la longitud de onda/frecuencia cuando existe un movimiento relativo

Efecto Doppler en ondas de sonido

Cuando escuchamos un sonido habitualmente suponemos que la frecuencia (el *tono*) que escuchan nuestros oídos es la misma que emite la fuente. Sin embargo, si la fuente de sonido se acerca a nosotros (o se aleja de nosotros), escucharemos un sonido con una frecuencia diferente. Normalmente solo nos damos cuenta de ello cuando el movimiento es rápido; el ejemplo más frecuente es el del sonido de un coche o un tren que pasa rápidamente por delante de nosotros.

Este cambio de frecuencia que se detecta cuando existe un movimiento relativo entre la fuente y el receptor se denomina **efecto Doppler**, en honor del físico austríaco Christian Doppler, que fue el primero en proponerlo en 1842. El efecto Doppler se puede producir con cualquier tipo de onda.

En la Figura 9.46 se representa un experimento demostrativo del efecto Doppler con ondas de sonido, en el que se hace girar una pequeña fuente de sonido (de frecuencia única) describiendo un círculo. Cuando la fuente se mueve hacia el oyente, este escucha una frecuencia mayor, mientras que cuando se aleja, la frecuencia que escucha es menor.

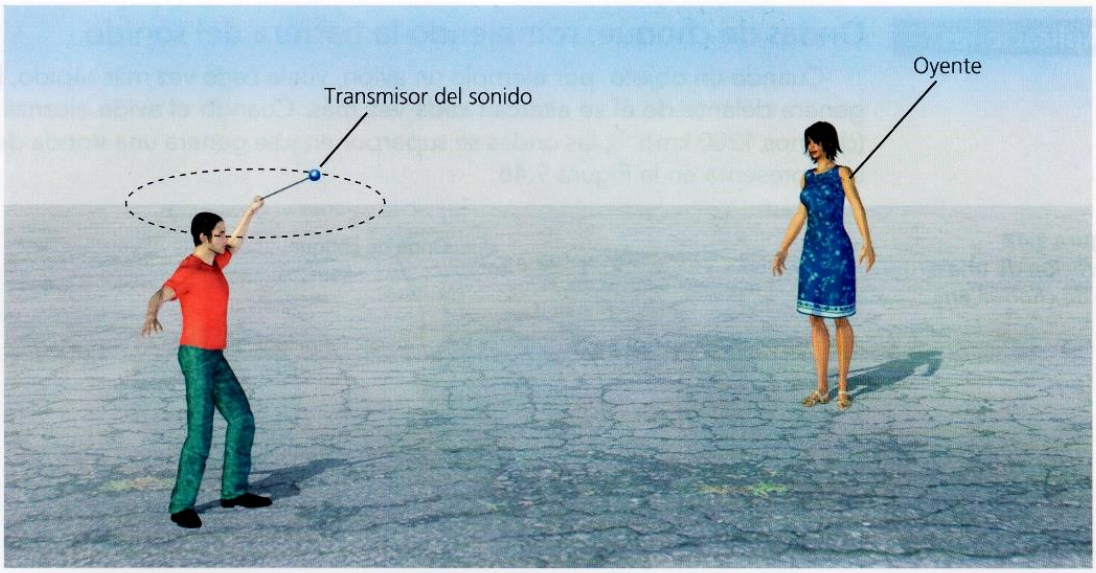


Figura 9.46
Demostración del efecto Doppler con ondas de sonido

Enlace con la teoría del conocimiento

Para comprender fenómenos que no podemos observar directamente es importante aplicar nuestra experiencia directa

*¿Cuál es la importancia de la **percepción sensorial** en la explicación de ideas científicas como el efecto Doppler?*

El efecto Doppler se puede producir con cualquier tipo de onda, pero parece mucho más fácil de entender cuando lo hemos escuchado en ondas de sonido. Análogamente, la interferencia y la difracción de microondas (por ejemplo) es mucho más fácil de entender si hemos observado efectos similares con luz y sonido.

La manera más fácil de explicar el efecto Doppler es mediante frentes de onda (Figura 9.47). En la Figura 9.47a se representa la situación habitual en la que una fuente estacionaria, S, emite ondas que viajan hacia un detector estacionario, D. En la Figura 9.47b se representa un detector que se acerca hacia la fuente estacionaria y en la Figura 9.47c, una fuente que se mueve directamente hacia un detector estacionario. Si la fuente y el detector se alejaran se podrían dibujar diagramas equivalentes. La mejor manera de entender el efecto Doppler es mediante la observación de simulaciones de ordenador de fuentes y observadores en movimiento.

El detector de la Figura 9.47b se encontrará con más frentes de onda en un intervalo de tiempo dado que si se quedara inmóvil; por tanto, la frecuencia recibida, f', es mayor que la frecuencia emitida, f. En la Figura 9.47c la distancia entre los frentes de onda de la fuente y el observador (la longitud de onda recibida) se reduce, lo que significa, de nuevo, que la frecuencia recibida será mayor que la emitida. (Frecuencia = v/λ y la velocidad de la onda, v, es constante. La velocidad del sonido a través del aire no varía con el movimiento de la fuente o el detector).

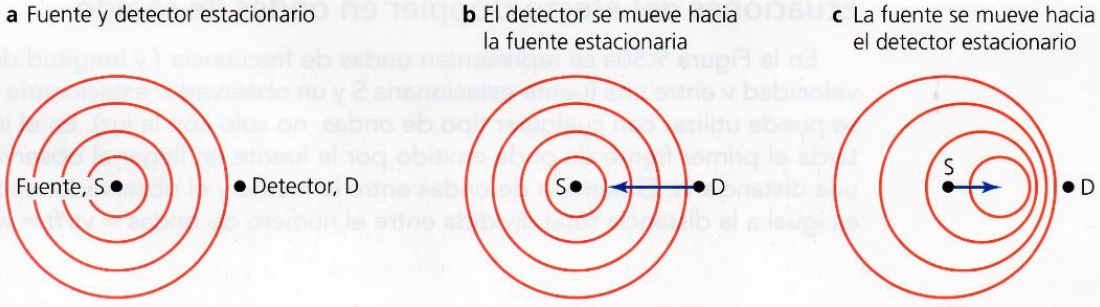


Figura 9.47
Diagramas de frentes de onda para visualizar el efecto Doppler

Aplicaciones

Ondas de choque: rompiendo la barrera del sonido

Cuando un objeto, por ejemplo un avión, vuela cada vez más rápido, las ondas de sonido que genera delante de él se acercan cada vez más. Cuando el avión alcanza la velocidad del sonido (de unos 1200 km h^{-1}), las ondas se superponen y se genera una «onda de choque». Este proceso se representa en la Figura 9.48.

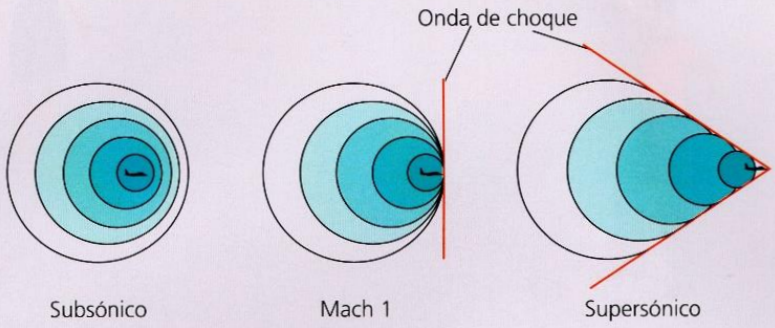


Figura 9.48
Generación de una onda de choque en aire

Cuando un avión alcanza la velocidad del sonido se dice que viaja a «Mach 1» (en honor del físico austríaco Ernst Mach). Las velocidades superiores se denominan «supersónicas» y se habla de Mach 2 cuando la velocidad es el doble que la del sonido, etc. Como se puede ver en la Figura 9.49, las ondas de choque se alejan lateralmente del avión y se escuchan desde tierra como un «estampido ultrasónico». De manera similar se pueden ver a menudo las «olas de proa» que se propagan desde la proa de un barco porque las velocidades de estos suelen ser mayores que las de las olas que generan. La energía transmitida por estas olas puede provocar muchos daños en las riberas de los ríos.

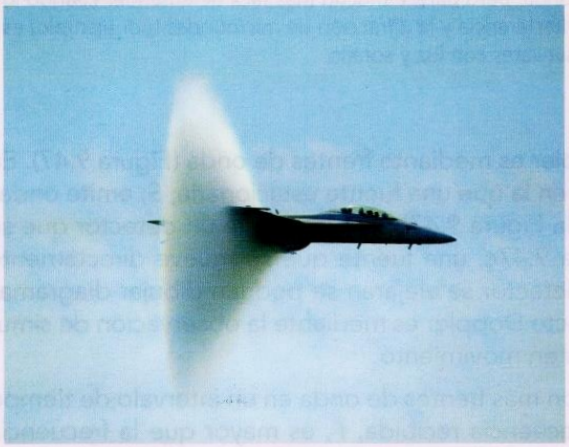


Figura 9.49
Un avión rompiendo la barrera del sonido

Durante muchos años los ingenieros dudaron de si se podría superar algún día la barrera del sonido. El primer vuelo supersónico (con piloto) confirmado tuvo lugar en 1947. Actualmente es habitual que los aviones militares superen Mach 1, pero el Concorde y el Tupolev 144 fueron los únicos aviones de pasajeros supersónicos en vuelo regular.

Se puede utilizar un látigo para romper la barrera del sonido: si el grosor del látigo disminuye hacia la punta, la velocidad de la onda que lo atraviesa puede aumentar hasta que la punta viaje más rápido que el sonido (en aire). El sonido que produce se suele describir como un «chasquido».

1 En un mundo en el que el tiempo es tan importante para tantas personas, sugiere motivos por los que ya no se utilizan aviones supersónicos en vuelos comerciales.

Ecuaciones del efecto Doppler en ondas de sonido

En la Figura 9.50a se representan ondas de frecuencia f y longitud de onda λ que viajan a una velocidad v entre una fuente estacionaria S y un observador estacionario O. (El término *observador* se puede utilizar con cualquier tipo de ondas, no solo con la luz). En el intervalo de tiempo, t, que tarda el primer frente de onda emitido por la fuente en llegar al observador, la onda ha recorrido una distancia vt. El número de ondas entre la fuente y el observador es ft. La longitud de onda, λ, es igual a la distancia total dividida entre el número de ondas = $vt/ft = v/f$, como cabría esperar.

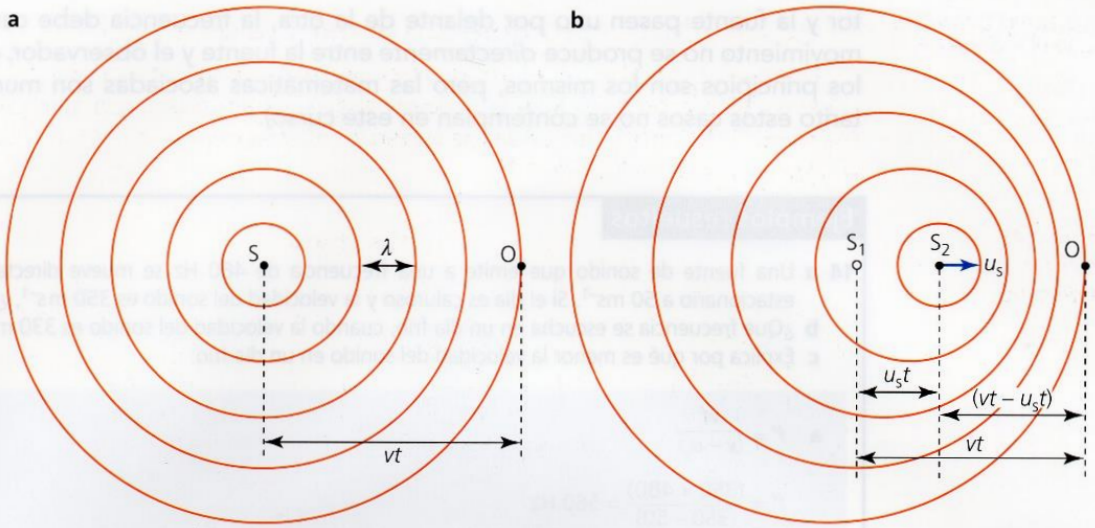


Figura 9.50
a *Ondas entre una fuente estacionaria y un observador estacionario*
b *Ondas entre una fuente en movimiento y un observador en movimiento*

En la Figura 9.50b se representan exactamente las mismas ondas emitidas durante el mismo intervalo de tiempo desde una fuente que se mueve hacia un observador estacionario con una velocidad u_s. Durante este tiempo, t, la fuente se ha desplazado desde S_1 hasta S_2. El número de ondas es el mismo que en la Figura 9.50a, pero como la fuente se ha desplazado hacia delante una distancia, $u_s t$, las ondas entre la fuente y el observador están ahora comprimidas dentro de la longitud $vt - u_s t$.

Esto significa que la longitud de onda observada (recibida), λ', es igual a la distancia total dividida entre el número de ondas:

$$\lambda' = \frac{vt - u_s t}{ft} = \frac{v - u_s}{f}$$

La frecuencia observada (recibida), f', viene dada por:

$$f' = \frac{v}{\lambda} = \frac{vf}{v - u_s}$$

Si la fuente se aleja del observador, la ecuación se convierte en:

$$f' = \frac{vf}{v + u_s}$$

En general podemos escribir:

$$f' = f\left(\frac{v}{v \pm u_s}\right)$$

Esta es la ecuación para el efecto Doppler en el caso de una fuente en movimiento detectada por un observador estacionario; figura en el *Apéndice de datos de Física*.

En una situación análoga, la ecuación para la frecuencia detectada por un *observador en movimiento* desde una fuente estacionaria es:

$$f' = f\left(\frac{v \pm u_o}{v}\right)$$

Esta ecuación también figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Si la fuente de sonido y el observador se acercan a lo largo de la recta que los une, el observador detecta un sonido de frecuencia constante y mayor que la emitida, aunque aumenta en intensidad. De manera similar, si la fuente y el observador se alejan, el sonido detectado tendrá una frecuencia constante y menor (que la emitida), aunque decrecerá en intensidad. Cuando el detec-

tor y la fuente pasen uno por delante de la otra, la frecuencia debe cambiar rápidamente. (Si el movimiento no se produce *directamente* entre la fuente y el observador, o bien ambos se mueven, los principios son los mismos, pero las matemáticas asociadas son mucho más complejas y por tanto estos casos no se contemplan en este curso).

Ejemplos resueltos

14 **a** Una fuente de sonido que emite a una frecuencia de 480 Hz se mueve directamente hacia un observador estacionario a 50 ms^{-1}. Si el día es caluroso y la velocidad del sonido es 350 ms^{-1}, ¿qué frecuencia se recibe?
b ¿Qué frecuencia se escucha en un día frío, cuando la velocidad del sonido es 330 ms^{-1}?
c Explica por qué es menor la velocidad del sonido en un día frío.

a $f' = \frac{vf}{(v - u_s)}$

$f' = \frac{(350 \times 480)}{(350 - 50)} = 560$ Hz

b $f' = \frac{(330 \times 480)}{(330 - 50)} = 566$ Hz

c El sonido se transfiere a través de las moléculas de aire en movimiento. En un día frío, la velocidad media de las moléculas es menor.

15 ¿Qué frecuencia recibe un observador que se aleja directamente de una fuente estacionaria de ondas de sonido de frecuencia 980 Hz a una velocidad de 14 ms^{-1}? (Consideremos que la velocidad del sonido es 342 ms^{-1}).

$f' = f\left(\frac{v - u_o}{v}\right)$

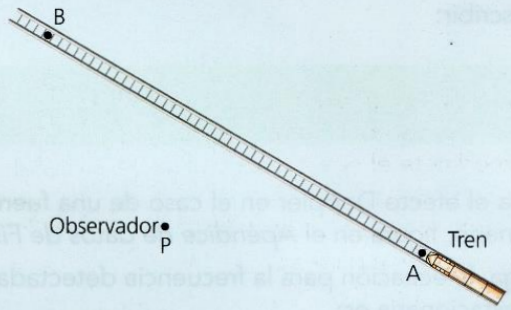
$f' = 980 \times \left(\frac{(342 - 24)}{342}\right) = 910$ Hz

60 Un observador recibe sonido de frecuencia 436 Hz procedente de un tren que se mueve a 18 ms^{-1} directamente hacia él. ¿Cuál es la frecuencia emitida? (Consideremos que la velocidad del sonido es 342 ms^{-1}).

61 Un observador se mueve directamente hacia una fuente de sonido que emite a 256,0 Hz con una velocidad de 26,0 ms^{-1}. Si la frecuencia del sonido recibido es 275,7 Hz, ¿cuál es la velocidad del sonido?

62 Un coche que emite un sonido de frecuencia 190 Hz se aleja directamente de un observador que detecta un sonido de frecuencia 174 Hz. ¿Cuál es la velocidad del coche? (Consideremos que la velocidad del sonido es 342 ms^{-1}).

63 Un tren viaja a velocidad constante por una vía, tal como se representa en la Figura 9.51, y emite un sonido de frecuencia constante.



■ **Figura 9.51**

a Sugiere cómo cambia el sonido que escucha un observador situado en el punto P a medida que el tren pasa de A a B.
b Describe el sonido que escucha una persona sentada en el tren durante el mismo intervalo de tiempo anterior.

64 La fuente de sonido que se muestra en la Figura 9.46 rota con una velocidad de 4,2 revoluciones por segundo describiendo un círculo de radio 1,3 m. Si la frecuencia del sonido emitido es 287 Hz, ¿cuál es la diferencia entre la frecuencia más alta y la más baja escuchadas? (Consideremos que la velocidad del sonido es 340 ms^{-1}).

Efecto Doppler con ondas electromagnéticas

El efecto Doppler también se produce con ondas electromagnéticas, pero en este caso la situación es más compleja porque la velocidad recibida no se ve afectada por la velocidad del observador. Las ecuaciones anteriores no se pueden utilizar con ondas electromagnéticas.

Sin embargo, si la velocidad relativa entre la fuente y el observador, v, es mucho menor que la velocidad de la onda electromagnética, c ($v << c$), entonces el cambio (desplazamiento) de la frecuencia, Δf, o de la longitud de onda, $\Delta\lambda$, vienen dados por la siguiente ecuación.

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{v}{c}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Como la velocidad de las ondas electromagnéticas es tan elevada ($c = 3{,}00 \times 10^8\,\text{m s}^{-1}$ en el vacío o en el aire) esta ecuación se puede utilizar casi siempre como una aproximación exacta.

Ejemplo resuelto

16 Un avión que vuela a una velocidad de $250\,\text{m s}^{-1}$ transmite una señal de radio a una frecuencia de 130 MHz. ¿Qué cambio de frecuencia se detecta en el aeropuerto hacia el que se dirige directamente el avión?

$$f = \frac{v}{c} f = \frac{250}{3{,}00 \times 10^8} \times 1{,}3 \times 10^8 = 108\,\text{Hz}$$

El aeropuerto recibe una frecuencia 108 Hz superior a $1{,}3 \times 10^8$ Hz. Se trata de un incremento muy pequeño cuya detección requiere circuitos electrónicos de buena calidad.

El desplazamiento de las frecuencias luminosas no es, claramente, algo que podamos observar en la vida diaria, sino que es más significativo en objetos que se mueven muy rápido, como las estrellas.

Utilización del efecto Doppler para determinar la velocidad

Naturaleza de la ciencia

La utilización del efecto Doppler requiere un alto nivel de tecnología

Puede que, cuando se estudia por vez primera, el efecto Doppler no parezca tan importante. Sin embargo tiene, sorprendentemente, un gran número de interesantes y útiles aplicaciones, mayoritariamente en cuanto a la determinación de velocidades, tal como se indica en el título de este apartado. La relación matemática entre la velocidad y el desplazamiento de la frecuencia es directa, pero su uso para la determinación exacta de velocidades depende del empleo de un alto nivel de tecnología y de instrumentos de medida muy sofisticados.

Para medir la velocidad (media) de un objeto en movimiento podemos observar su posición en dos momentos distintos en un intervalo de tiempo conocido. Una manera de hacerlo, especialmente cuando el objeto es inaccesible (como un avión, por ejemplo), es mediante el envío de ondas que se reflejan hacia el transmisor. Los datos obtenidos permiten determinar la dirección entre el transmisor y el avión, y la distancia entre ambos se puede calcular a partir del retraso temporal entre la señal enviada y la señal recibida. Si el proceso se repite, se puede determinar la velocidad del avión. En este ejemplo de sistema **radar** primario simple se utilizan microondas.



Figura 9.52
En el control del tráfico aéreo se utiliza el efecto Doppler

El efecto Doppler ofrece un método mejor para determinar la velocidad de un objeto en movimiento (como un avión) utilizando el mismo tipo de ondas. Este método se emplea en el control del tráfico aéreo de los aeropuertos de todo el mundo (véase la Figura 9.52). Algunos animales, como los murciélagos (véase la Figura 9.53) y los delfines, utilizan los mismos principios pero con ondas sónicas o ultrasónicas.

Si se dirigen ondas de velocidad, v, y frecuencia, f, conocidas, hacia un objeto en movimiento y se reflejan en este, el objeto actúa en la práctica como una fuente de ondas en movimiento. Las ecuaciones para el efecto Doppler se pueden utilizar para determinar la velocidad del objeto siempre que se pueda medir la frecuencia recibida, f'.

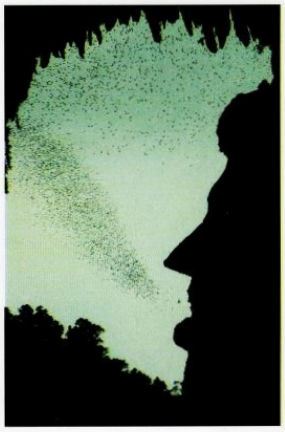


Figura 9.53
Estos murciélagos de Malasia utilizan el efecto Doppler para navegar

El efecto Doppler se usa frecuentemente para medir la velocidad de un coche, un avión u otro vehículo. En muchos países la policía determina la velocidad de los coches mediante la reflexión de ondas electromagnéticas sobre ellos. En estos casos se utilizan microondas y radiación infrarroja. El efecto Doppler también se emplea en el deporte para determinar la velocidad de los atletas o de las pelotas. La medida de la tasa de flujo sanguíneo arterial es otro interesante ejemplo, que se representa en la Figura 9.54.

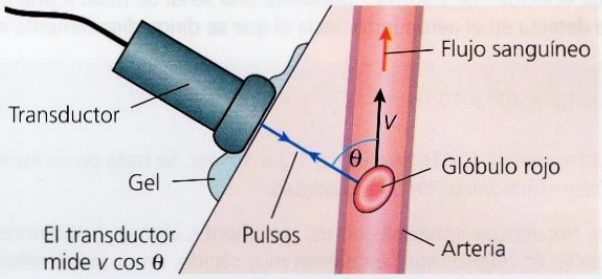


Figura 9.54
Medida de la tasa de flujo sanguíneo utilizando el efecto Doppler

Los pulsos de ondas ultrasónicas se envían al cuerpo desde el **transductor** y son reflejados por los glóbulos rojos sanguíneos que circulan por la arteria. La frecuencia de las ondas recibidas es distinta como consecuencia del efecto Doppler y este cambio en la frecuencia se puede utilizar para calcular la velocidad de la sangre. Los médicos pueden diagnosticar diversas enfermedades a partir de esta información. Como las ondas normalmente no se pueden dirigir a lo largo de la línea de circulación de la sangre, la velocidad calculada será una componente ($v \cos \theta$).

El efecto Doppler tiene, además, importantes aplicaciones en la astronomía. La disminución de la frecuencia de la radiación recibida desde las galaxias lejanas se denomina «desplazamiento hacia el rojo» y ofrece una valiosa información sobre la naturaleza y la edad del universo. Este tema se trata con más detalle en la opción de astronomía. Véase también la pregunta 68.

La predicción meteorológica es otra interesante aplicación del efecto Doppler (radar meteorológico). Se puede determinar la ubicación y la velocidad de la lluvia, por ejemplo, utilizando el efecto Doppler con ondas de longitudes de onda del orden de 10 cm.

65 **a** ¿Qué cambio de frecuencia se recibirá desde un coche que se aleja directamente a 135 $km\,h^{-1}$ si la frecuencia de la radiación utilizada en el radar de control de velocidad «radar pistola» es de 24 GHz?
b Argumenta por qué no se suelen utilizar ondas ultrasónicas en los radares pistola.

66 Un sistema de radar de aeropuerto que utiliza microondas de frecuencia 98,2 MHz envía un pulso de ondas que se refleja en un avión que vuela alejándose. Si la señal reflejada se recibe en el aeropuerto al cabo de $8{,}43 \times 10^{-5}$ s y con una frecuencia 85,2 Hz inferior a la emitida, ¿qué velocidad llevaba el avión y a qué distancia se encontraba?

67 En las retransmisiones televisivas de algunos deportes, como por ejemplo el béisbol, el tenis y el críquet, los telespectadores pueden ver la repetición de la trayectoria de la pelota en movimiento. Consulta en Internet cómo se hace. (¿Se utiliza el efecto Doppler?).

68 Una estrella emite radiación de frecuencia $1{,}42 \times 10^9$ Hz y la frecuencia recibida en la Tierra es $1{,}38 \times 10^9$ Hz. ¿Cuál es la velocidad de la estrella? ¿Se acerca a la Tierra, o bien se aleja de esta?

Selección de preguntas de examen

Hoja 1 Preguntas del IB y preguntas tipo IB

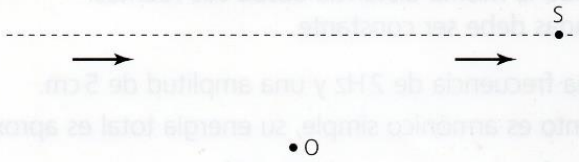
1 Una fuente de sonido móvil pasa por delante de un observador estacionario con una velocidad *v*. Si la velocidad del sonido en aire es *c*, ¿qué velocidad llevan las ondas cuando pasan por delante del observador?

A. c **B.** $c - v$ **C.** $c + v$ **D.** $v - c$

2 La ecuación $\theta = \lambda/b$ se utiliza para describir la difracción a través de una rendija simple. En esta ecuación:

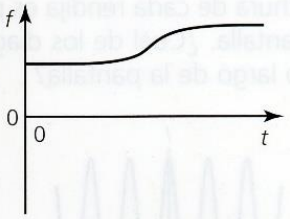
A. b es la anchura de los flecos que se ven sobre la pantalla
B. b es la diferencia de trayectoria entre las ondas que llegan a flecos consecutivos
C. θ es la anchura angular del máximo central
D. θ es la mitad de la anchura angular del máximo central.

3 Una fuente S que se mueve a velocidad constante emite un sonido de frecuencia constante. La fuente pasa por delante de un observador estacionario O tal como se muestra abajo.

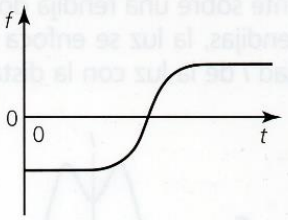


¿Cuál de las gráficas siguientes muestra la variación con el tiempo *t* de la frecuencia *f* que se observa en O cuando la fuente S se acerca y pasa por delante del observador?

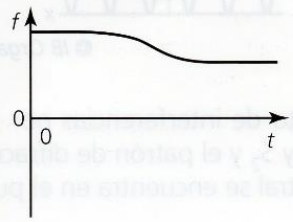
A.



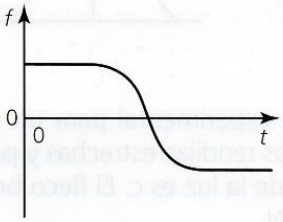
B.



C.



D.



© IB Organization

4 ¿Cuál de las opciones siguientes no representa (por sí misma) una posible manera de aumentar la resolución de un telescopio óptico?

A. Aumentar el tamaño de las lentes.
B. Utilizar un filtro de color azul.
C. Utilizar lentes más potentes para producir una mayor magnificación.
D. Utilizar lentes de mejor calidad.

5 Una partícula experimenta oscilaciones armónicas simples. ¿Cuál de las magnitudes siguientes no se verá afectada por una reducción de la amplitud de las oscilaciones?

A. la energía total
B. la velocidad máxima
C. la aceleración máxima
D. el periodo.

© IB Organization

6 Un péndulo simple experimenta un MAS. ¿Cuál de las afirmaciones siguientes sobre su periodo es correcta?

A. Si se llevara a la Luna, tendría el mismo periodo.
B. Si se duplicara su longitud, su periodo aumentaría en un factor $\sqrt{2}$.
C. Si se duplicara su masa, su periodo se reduciría a la mitad.
D. Su periodo aumentaría gradualmente a medida que se disipara energía.

7 Se observa que el espectro de luz recibido desde galaxias lejanas tiene un desplazamiento hacia el rojo. Este desplazamiento se puede explicar porque:

A. las galaxias se alejan unas de otras
B. las galaxias rotan
C. la Tierra gira
D. las temperaturas de las galaxias son muy elevadas.

8 Las ondas de sonido procedentes de dos altavoces separados se encuentran en un punto. ¿Cuál de las condiciones siguientes es necesaria para que se escuche algún tipo de efecto de interferencia?

A. Las ondas deben llegar al punto de encuentro en fase.
B. Las ondas deben tener la misma amplitud.
C. Las ondas deben haber recorrido la misma distancia desde sus fuentes.
D. La diferencia de fase de las ondas debe ser constante.

9 Una masa de 0,5 kg oscila con una frecuencia de 2 Hz y una amplitud de 5 cm.

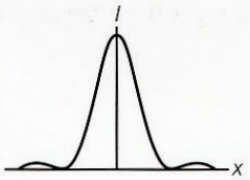
a Si suponemos que el movimiento es armónico simple, su energía total es aproximadamente:

A. 10^{-2} J **B.** 10^{-1} J **C.** 10^{1} J **D.** 10^{3} J

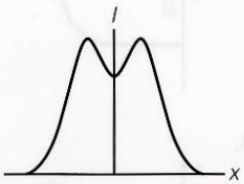
b La velocidad máxima del oscilador es aproximadamente:

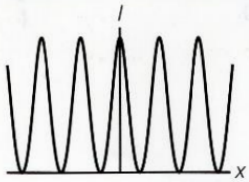
A. $10^{-1}\,m\,s^{-1}$ **B.** $10^{0}\,m\,s^{-1}$ **C.** $10^{1}\,m\,s^{-1}$ **D.** $10^{2}\,m\,s^{-1}$

10 Una luz monocromática y coherente incide normalmente sobre una rendija doble. La anchura de cada rendija es pequeña comparada con su separación. Tras atravesar las rendijas, la luz se enfoca sobre la pantalla. ¿Cuál de los diagramas siguientes representa mejor la variación de la intensidad *I* de la luz con la distancia *x* a lo largo de la pantalla?

A. 

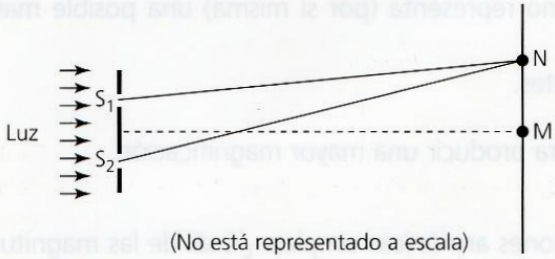
B. 

C. 

D. 

© IB Organization

11 En el diagrama inferior se representa una disposición experimental para un experimento de interferencias por rendija doble. La luz coherente de frecuencia *f* incide sobre dos rendijas estrechas y paralelas S_1 y S_2 y el patrón de difracción se observa sobre una pantalla muy alejada. La velocidad de la luz es *c*. El fleco brillante central se encuentra en el punto M y el siguiente fleco brillante se encuentra en el punto N.



(No está representado a escala)

La distancia $S_2N–S_1N$ es igual a:

A. $\frac{c}{2f}$ **B.** $\frac{c}{f}$ **C.** $\frac{f}{2c}$ **D.** $\frac{f}{c}$

© IB Organization

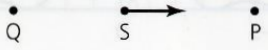
12 ¿Cuál de los cambios siguientes dará lugar a un aumento de la separación entre flecos en la pregunta anterior?

A. Una disminución de la frecuencia de la luz incidente.
B. Una disminución de la distancia entre las rendijas y la pantalla.
C. Un aumento de la separación entre las rendijas.
D. Un aumento de la intensidad de la luz incidente sobre las rendijas.

© IB Organization

Hoja 2 Preguntas del IB y preguntas tipo IB

1 En este diagrama se representa una fuente de sonido, S, que se mueve en la dirección y sentido indicados por la flecha con velocidad constante. El sonido emitido por S se recibe en los puntos estacionarios P y Q.



a Copia el diagrama y representa una serie de frentes de onda emitidos por S. (2)
b Utiliza tu dibujo para explicar las diferencias en los sonidos que se escuchan en los puntos P y Q. (3)
c **i** Cómo se denomina este efecto?
ii Da un ejemplo cotidiano de este efecto. (2)

© IB Organization

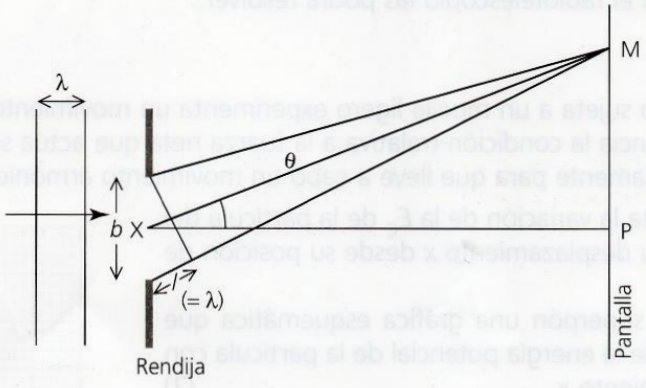
2 Los radiotelescopios se pueden utilizar para localizar galaxias lejanas. Se puede aumentar su capacidad para resolver las imágenes de las galaxias mediante el uso de dos telescopios separados una larga distancia *D*. Los telescopios se comportan como si fueran un solo radiotelescopio con un plato de diámetro *D*.

Las imágenes de dos galaxias lejanas G_1 y G_2 se encuentran en el límite de resolución de los dos microscopios.

a Enuncia cuál es el fenómeno que limita la capacidad de los radiotelescopios para resolver imágenes. (1)
b Enuncia el criterio de Rayleigh para el límite de resolución de las imágenes G_1 y G_2. (1)
c Determina la separación *d* entre las galaxias G_1 y G_2 mediante los datos siguientes. (1)
distancia efectiva entre G_1-G_2 y la Tierra = $2{,}2 \times 10^{25}$ m
separación $D = 4{,}0 \times 10^{3}$ m
longitud de onda de las ondas de radio recibidas desde G_1 y G_2 = 0,14 m

© IB Organization

3 **a** Sobre una rendija estrecha inciden frentes de onda planos de luz monocromática de longitud de onda λ que, tras atravesarla, inciden sobre una pantalla muy alejada.



A.

La anchura de la rendija es *b* y el punto X se encuentra en su centro. El punto M representa la posición del primer mínimo del patrón de difracción formado sobre la pantalla. La diferencia de trayectoria entre la luz del extremo superior de la rendija y la del extremo inferior es *l*.

Utiliza el diagrama para explicar por qué la distancia *l* es igual a λ. (3)

Los frentes de onda de a provienen de una fuente puntual monocromática S_1. En el diagrama 1 se representa esquemáticamente la variación con el ángulo θ de la intensidad del patrón de difracción generado por una rendija simple. Las unidades del eje vertical son arbitrarias.

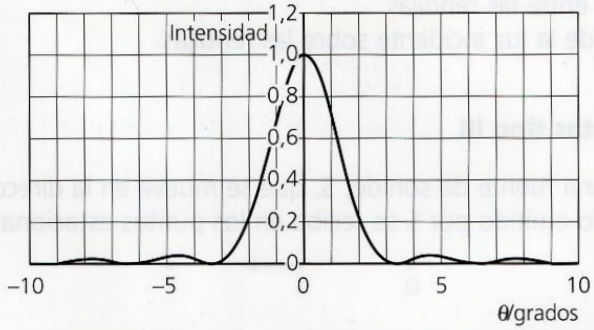


Diagrama 1

Cerca de S_1 se sitúa otra fuente puntual idéntica S_2, tal como se muestra en el diagrama 2.

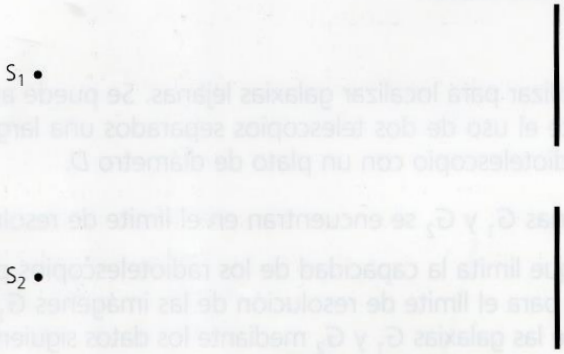


Diagrama 2

a Los patrones de difracción generados por cada fuente se encuentran en el límite de resolución. Copia el diagrama 1 y esboza la distribución de la intensidad de la luz procedente de la fuente S_2. (2)

b Explica brevemente cómo afecta el criterio de Rayleigh al diseño de los radiotelescopios. (2)

c El plato del radiotelescopio de Arecibo tiene un diámetro de 300 m. Dos fuentes emisoras de ondas de radio de longitud de onda 21 cm están separadas $2{,}0 \times 10^{12}$ m y se encuentran a $3{,}0 \times 10^{16}$ m de la Tierra. Determina si el radiotelescopio las podrá resolver. (3)

© IB Organization

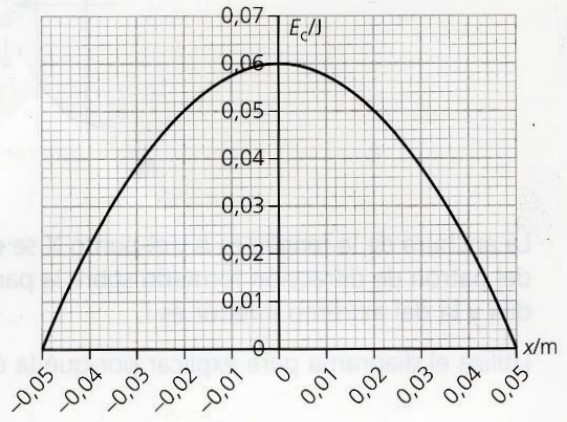
4 a Una partícula de masa *m* sujeta a un muelle ligero experimenta un movimiento armónico simple en *dirección horizontal*. Enuncia la condición (relativa a la fuerza neta que actúa sobre la partícula) que se debe cumplir necesariamente para que lleve a cabo un movimiento armónico simple. (2)

b En la gráfica se representa la variación de la E_C de la partícula del apartado **a** respecto a su desplazamiento *x* desde su posición de equilibrio.

i Copia el diagrama y superpón una gráfica esquemática que muestre la variación de la energía potencial de la partícula con respecto al desplazamiento *x*. (2)

ii La masa de la partícula es 0,30 kg. Utiliza los datos de la gráfica para demostrar que la frecuencia *f* de oscilación de la partícula es 2,0 Hz. (2)

© IB Organization



10 Campos

IDEAS FUNDAMENTALES

- Las cargas eléctricas y las masas influyen en el espacio que las rodea y esta influencia se puede representar mediante el concepto de campo.
- Los problemas relativos a potencial eléctrico y potencial gravitatorio se pueden abordar de forma similar.

10.1 Descripción de los campos

Las cargas eléctricas y las masas influyen en el espacio que las rodea y esta influencia se puede representar mediante el concepto de campo

El concepto de campo ya lo hemos tratado en este texto, particularmente en los capítulos 5 y 6. En este capítulo repasaremos rápidamente las ideas relativas a las fuerzas en campos eléctricos y gravitatorios, así como el concepto de intensidad del campo. A continuación desarrollaremos estas ideas para profundizar en el tema de la energía de los campos, e introducir el concepto fundamental de *potencial*. En el apartado 10.2 se tratan con más detalle los modelos matemáticos de los campos, en particular los radiales.

Los físicos utilizan la teoría de campos para explicar las fuerzas que actúan «a distancia» a través del espacio. En este capítulo trataremos solo con campos gravitatorios y campos eléctricos. Tal como explicamos en los Capítulos 5 y 6, las fuerzas entre masas puntuales y entre cargas puntuales presentan muchas similitudes matemáticas, por tanto, una buena comprensión de los campos gravitatorios es útil, a su vez, para el estudio de los campos eléctricos.

Naturaleza de la ciencia

Un cambio de paradigma en la comprensión de las fuerzas

Aunque todos nosotros estamos acostumbrados a la fuerza de la gravedad, el hecho de que algunos tipos de fuerzas (como la gravedad) puedan actuar a través del espacio vacío es muy difícil de comprender desde el punto de vista conceptual. Esta dificultad de comprensión es todavía mayor si pensamos que estas fuerzas parecen actuar de forma instantánea, con independencia de la distancia. La física clásica no puede ofrecer una explicación y se ha necesitado un modelo completamente nuevo (un **cambio de paradigma**) para explicar las interacciones «a distancia» entre cargas o entre masas.

El concepto de intercambio de partículas se introdujo en el Capítulo 7, pero en el capítulo actual nos interesa la descripción y el uso de los campos, más que la explicación de la verdadera naturaleza de las interacciones. Comenzaremos con un repaso de las ideas que hemos tratado en capítulos anteriores.

Campos gravitatorios

- Existe un campo gravitatorio allí donde una masa experimenta una fuerza gravitatoria.
- Las fuerzas gravitatorias entre dos masas, M y m, separadas por una distancia r se describen mediante la ley de gravitación de Newton: $F = GMm/r^2$ (una ley del inverso del cuadrado de la distancia). G es la constante de gravitación universal.
- Las fuerzas gravitatorias solo pueden ser atractivas.
- La intensidad del campo gravitatorio = fuerza gravitatoria/masa: $g = F_g/m$ (unidad $\mathrm{N\,kg^{-1}}$).
- El campo gravitatorio es una magnitud vectorial que tiene la misma dirección y sentido que la fuerza gravitatoria.
- Los campos gravitatorios se pueden representar sobre papel mediante líneas de campo.
- Los campos gravitatorios tienden a ser dominantes en el mundo macroscópico.

Campos electrostáticos

- Existe un campo eléctrico allí donde una carga experimenta una fuerza eléctrica. Si la fuerza es constante, decimos que el campo es **electrostático**.
- Las fuerzas eléctricas entre dos cargas, q_1 y q_2, separadas por una distancia r se describen mediante la ley de Coulomb: $F = kq_1q_2/r^2$ (una ley del inverso del cuadrado de la distancia). k es la constante de Coulomb.

- Las fuerzas eléctricas pueden ser atractivas (entre cargas opuestas), o repulsivas (entre cargas similares).
- El campo eléctrico es una magnitud vectorial que tiene la misma dirección y sentido que la fuerza sobre una carga positiva.
- El módulo de la intensidad del campo eléctrico = fuerza eléctrica/carga. $E = F_q/q$. (Unidad NC^{-1})
- Los campos eléctricos se pueden representar sobre papel mediante líneas de campo.
- Los campos eléctricos tienden a ser dominantes en el mundo microscópico.

Perspectivas adicionales

Campos gravitatorios y ciclo lunar

Podemos ver la Luna porque refleja la luz procedente del Sol. La apariencia de la Luna (*fase*) cambia a medida que describe órbitas alrededor de la Tierra, porque la luz procedente del Sol incide sobre un porcentaje variable de la cara de la Luna que está frente a la Tierra, según las posiciones relativas del Sol, la Tierra y la Luna. Cuando observamos una Luna perfectamente circular, o «luna llena», la totalidad de la cara de la Luna que está frente a la Tierra está iluminada, y este fenómeno ocurre cada 29,53 días. De hecho, la Luna describe una órbita completa alrededor de la Tierra cada 27,32 días, pero el ciclo lunar es más largo porque depende de las posiciones relativas del Sol, la Tierra y la Luna, y no solo de la rotación de la Luna.

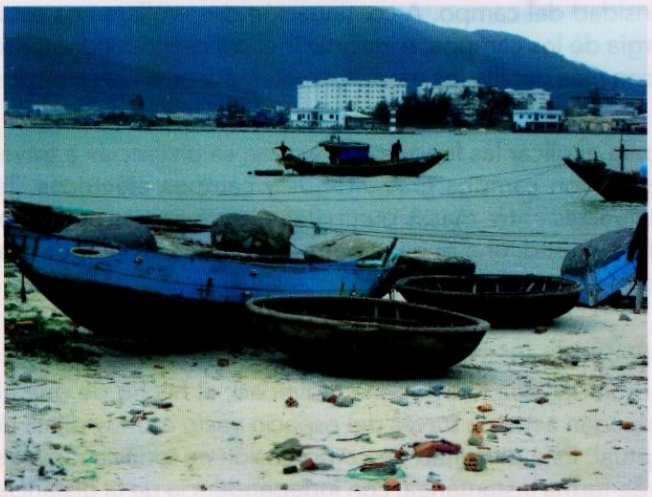


Figura 10.1
Barcas varadas en la arena en marea baja en Vietnam

Las fases regulares de la Luna han sido durante mucho tiempo la base de los calendarios y han marcado el ritmo de los eventos, festivales y vacaciones anuales.

La atracción gravitatoria mantiene a la Luna en órbita alrededor de la Tierra, y esta misma fuerza (del orden de 10^{20} N) también afecta a la Tierra. El efecto más destacado son las mareas oceánicas. Cuando la Tierra gira sobre su eje, el agua de los océanos es empujada hacia la Luna, lo que provoca una marea alta. Al mismo tiempo, se produce una marea baja en el lado opuesto de la Tierra, y como resultado se producen mareas altas (y mareas bajas) unas dos veces diarias en cada ubicación concreta. Los barcos que se encuentran en el mar cuando hay marea alta pueden quedar varados en la arena cuando el nivel del agua desciende en la marea baja (Figura 10.1).

El Sol también afecta a las mareas. Cuando la Tierra, el Sol y la Luna están casi alineados (en luna nueva o en luna llena), los efectos gravitatorios son mayores y las mareas son más altas.

1. Dibuja un diagrama para ilustrar las distintas fases de la Luna.
2. Nombra tres eventos pertenecientes a tres culturas o religiones distintas que tengan lugar en un momento del año determinado en función de la fase de la Luna. Explica cómo se decide el día exacto de uno de estos eventos cada año.
3. ¿Crees que la luna llena puede tener algún efecto sobre la conducta humana o animal? Argumenta científicamente tu respuesta.
4. Calcula la atracción gravitatoria entre la Luna y la Tierra.

Energía potencial de un campo

Cuando las masas (o las cargas) se desplazan en el mismo sentido o en sentido contrario a las fuerzas de un campo, se deben producir cambios en la energía potencial porque se debe realizar un trabajo. El trabajo realizado (cambio en la energía potencial) se puede calcular mediante $W = Fe \cos \theta$ si F es constante, o bien a partir del área bajo la curva F–e cuando la fuerza es variable, si se conoce la variación de la fuerza con la distancia (Capítulo 2).

De forma alternativa, podemos determinar un cambio en la energía potencial restando los valores de la energía potencial de dos puntos dados. Evidentemente, para poder efectuar esta resta necesitamos saber cómo calcular la energía potencial de una masa (o carga) *en un punto* determinado, y para ello debemos escoger primero un lugar de referencia donde podamos considerar que la energía potencial es nula.

En los cursos de física elemental, la energía potencial gravitatoria de una masa situada en un punto cercano a la superficie terrestre se suele calcular mediante la ecuación $E_P = mgh$. Este tipo de cálculos se basan en el supuesto de que una masa situada sobre la superficie terrestre tiene energía potencial cero, lo cual puede ser práctico para el cálculo, pero no tiene por qué ser la mejor opción si queremos que nuestros cálculos sean válidos para cualquier lugar del universo (un objetivo que persigue cualquier teoría física). En el Capítulo 2 insistimos en el uso de la expresión $\Delta E_P = mg\Delta h$ para calcular la *diferencia* de energía potencial gravitatoria entre dos lugares (en lugar de la energía potencial en un punto).

Los físicos consideran, lógicamente, que la energía potencial es cero cuando las masas (o las cargas) están tan separadas que no hay fuerzas entre ellas. Tanto en los campos eléctricos como en los gravitatorios, la variación de la fuerza con la distancia obedece a una ley del inverso del cuadrado de la distancia y, por tanto, las fuerzas nunca se reducen a cero. No obstante, en la práctica, cuando las distancias son grandes, las fuerzas se hacen muy pequeñas (despreciables).

El **infinito** es el lugar donde, por convenio, los valores de las energías potenciales gravitatoria y eléctrica son iguales a cero.

Naturaleza de la ciencia

Infinito

El *infinito* no es un lugar real, sino un concepto abstracto que aparece regularmente en física y en matemáticas.

La idea de una cantidad *infinita* (un campo, una distancia, el tiempo, un número, etc.) se utiliza en física para indicar una cantidad ilimitada (sin fin) y, por tanto, mayor que cualquier cantidad real y medible. El opuesto de infinito es **finito**, es decir, limitado.

Una mente humana puede llegar a aceptar ideas como una serie infinita de números, un tiempo infinito, e incluso un campo que se extiende indefinidamente (pero que se hace cada vez más pequeño), pero el concepto de un universo infinito es ya más difícil de comprender y aceptar.

Decimos que en cualquier sistema de masas (o cargas) hay energía potencial gravitatoria (o eléctrica) almacenada, porque en algún momento del pasado se realizó un trabajo para desplazar las masas (o las cargas) hasta sus posiciones actuales.

La energía potencial gravitatoria (o eléctrica) de un sistema, E_p, se define como el trabajo realizado para traer a la totalidad de las masas (o cargas) del sistema a sus posiciones actuales, suponiendo que se encontraban originalmente en el infinito (alejadas una distancia infinita).

El trabajo que se realizaría para desplazar una masa (o carga) hasta el infinito o desde este (Figura 10.2), *no* sería infinito porque las fuerzas asociadas son extraordinariamente pequeñas (despreciables) cuando las distancias son muy grandes.

El trabajo realizado para desplazar una masa (o carga) entre dos puntos en un campo *no* depende de la trayectoria seguida.

Debe quedar claro que la energía potencial se almacena en un *sistema* de masas (o cargas) y no en una única masa (o carga). Sin embargo, es muy habitual hablar de la energía potencial de una masa (o carga) individual más pequeña si la otra masa (o carga) es mucho mayor, de manera que casi no se ve afectada por los cambios que experimente la masa (o carga) más pequeña. Por ejemplo, podemos hablar de la energía potencial gravitatoria de un libro situado sobre la superficie terrestre, sin considerar la Tierra, o podemos referirnos a la energía potencial eléctrica de un electrón en un átomo, sin considerar el núcleo.

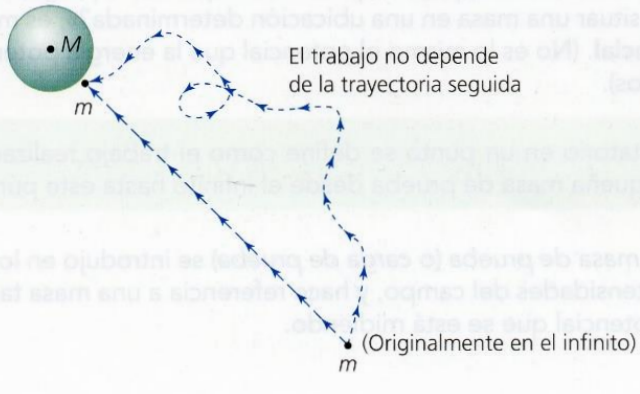


Figura 10.2
Desplazamiento de una masa desde el infinito

Ejemplos

Energía potencial gravitatoria

La energía potencial gravitatoria de una masa de 5 kg sobre la superficie terrestre (a modo de ejemplo) es aproximadamente $-3{,}13 \times 10^8$ J (se explica en la página 436). Esta afirmación significa que se tendría que *suministrar* una energía mínima de $3{,}13 \times 10^8$ J para desplazar la masa al lugar donde su energía potencial gravitatoria es cero (el infinito). La energía potencial gravitatoria de una masa sobre la Tierra + la energía transferida para desplazar la masa hasta el infinito = energía potencial gravitatoria de la masa en el infinito (cero):

$$(-3{,}13 \times 10^8) + (3{,}13 \times 10^8) = 0$$

El motivo por el que las energías potenciales gravitatorias son *siempre* negativas es porque las fuerzas gravitatorias son siempre atractivas, de manera que siempre se debe suministrar energía para alejar las masas.

Las energías potenciales gravitatorias son grandes porque normalmente están asociadas a una o más masas grandes (como la Tierra) y están relacionadas con desplazamientos hacia el infinito o desde este. Los *cambios* en la energía potencial son, por lo general, mucho menores, y pueden ser positivos o negativos: desplazar una masa de 5 kg una altura de 2 m (hacia arriba o hacia abajo) cerca de la superficie terrestre comporta unos ±100 J ($\Delta E_P = mg\Delta h$).

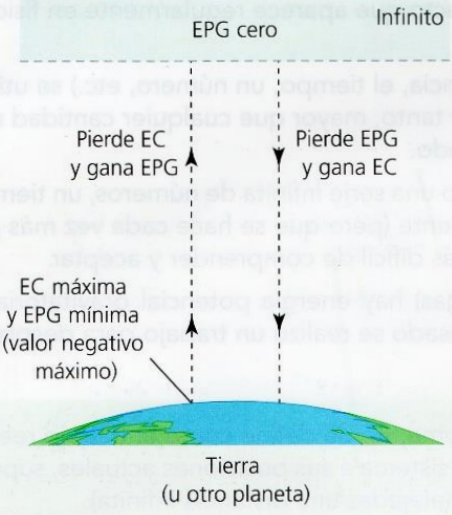


Figura 10.3
Cambios en la energía cuando hay un desplazamiento entre un planeta y el infinito

Cuando una masa cualquiera (una pelota, por ejemplo) es proyectada hacia arriba desde la superficie terrestre, pierde energía cinética (EC) y gana energía potencial gravitatoria (EPG). Esto también se cumple para una nave espacial no motorizada, e incluso para el caso teórico extremo en el que una masa «sube» hasta el infinito. Por los mismos motivos, una masa teórica que «baja» desde el infinito gana energía cinética y pierde energía potencial gravitatoria (como se muestra en la Figura 10.3), de manera que a su energía gravitatoria mínima (sobre la superficie terrestre) le corresponde su valor negativo máximo.

Energía potencial eléctrica

La energía potencial eléctrica de un electrón en un átomo de hidrógeno situado a una distancia $5{,}3 \times 10^{-11}$ m del protón es $-4{,}3 \times 10^{-18}$ J (se explica en la página 436). Esto significa que un electrón en movimiento debería tener una energía cinética mínima de $4{,}3 \times 10^{-18}$ J para poder alejarse una distancia infinita del protón y tener, en ese punto, energía potencial eléctrica cero. (El electrón que está en el interior del átomo ya tiene una cierta cantidad de energía cinética).

energía potencial eléctrica del átomo de hidrógeno + energía cinética del electrón para desplazarlo hasta el infinito = energía potencial eléctrica del electrón y del protón separados una distancia infinita

$$(-4{,}3 \times 10^{-18}) + (4{,}3 \times 10^{-18}) = 0$$

La energía potencial eléctrica puede ser negativa o positiva dependiendo de los signos de las cargas. Si las dos cargas son similares, la energía potencial es positiva, lo que indica que existe una fuerza repulsiva entre ellas de manera que, si se alejan, pierden energía potencial.

Potencial eléctrico y potencial gravitatorio

Cuando calculamos energías potenciales gravitatorias nos referimos a una masa (o carga) determinada en un lugar determinado, pero si queremos responder a preguntas del tipo «¿cuánta energía haría falta para situar una masa en una ubicación determinada?», es mejor utilizar el importante concepto de **potencial**. (No es lo mismo el potencial que la energía potencial, aunque están estrechamente vinculados).

El potencial gravitatorio en un punto se define como el trabajo realizado *por unidad de masa* para traer una pequeña masa de prueba desde el infinito hasta este punto.

El concepto de *masa de prueba* (o *carga de prueba*) se introdujo en los Capítulos 5 y 6, cuando se definieron las intensidades del campo, y hace referencia a una masa tan pequeña que no afecta ni al campo ni al potencial que se está midiendo.

La definición de potencial eléctrico es similar, excepto por el hecho de que se debe hacer referencia al signo de la carga. Como antes, cuando definimos la intensidad del campo eléctrico, escogemos por convenio referirnos a una *carga positiva*, por tanto:

El potencial eléctrico en un punto se define como el trabajo realizado *por unidad de carga* para traer una pequeña carga de prueba *positiva* desde el infinito hasta este punto.

En la práctica se considera que la Tierra es capaz de absorber cualquier cantidad de carga sin que afecte a su potencial, de manera que la *conexión a tierra* (toma de tierra) supone conectar de forma efectiva a potencial cero. Se suele considerar que el borne negativo de una batería está a cero voltios, pero para asegurarnos debemos conectarlo a tierra.

El potencial es la energía potencial por unidad de masa (o carga).

El potencial se representa con el símbolo V_g o V_e y sus unidades son los $J\,kg^{-1}$ o los $J\,C^{-1}$ (denominados habitualmente voltios, V). El potencial es una magnitud escalar.

$$V_g = \frac{E_P}{m}$$

y

$$V_e = \frac{E_P}{q}$$

Estas dos ecuaciones figuran en el *Apéndice de datos de Física* en la forma:

$$E_P = mV_g$$

$$E_P = qV_e$$

Volviendo a los ejemplos anteriores:

- Si la *energía potencial* gravitatoria de una masa de 5 kg sobre la superficie terrestre es $-3{,}13 \times 10^8$ J, entonces el *potencial* gravitatorio sobre la superficie terrestre es $(-3{,}13 \times 10^8)/5 = -6{,}26 \times 10^7\,J\,kg^{-1}$. Utilizando este valor para el potencial gravitatorio podemos calcular fácilmente la energía potencial gravitatoria de cualquier otra masa sobre la superficie terrestre. Por ejemplo, la energía potencial gravitatoria de una chica de masa 52,0 kg es:
  $52{,}0 \times (-6{,}26 \times 10^7) = -3{,}26 \times 10^9$ J
- Si la energía potencial eléctrica de un electrón de un átomo de hidrógeno es $-4{,}3 \times 10^{-18}$ J, entonces el potencial eléctrico en ese punto es:
  $$\frac{-4{,}3 \times 10^{-18}}{1{,}6 \times 10^{-19}} = -27\,J\,C^{-1} = -27 \text{ voltios}$$

Para comprender la diferencia entre energía potencial y potencial, puede ser de utilidad compararlos con el coste total de una mercancía y su precio por kilogramo. Podemos decir que el precio de una cierta cantidad de carne es 6 €, pero en general proporciona mayor información dar el precio por kilo: 14 € kg^{-1}, por ejemplo. Análogamente, podemos decir que la energía potencial de una masa de 5 kg en una ubicación determinada es $-3{,}13 \times 10^8$ J, pero si decimos que el potencial en ese punto es $-6{,}26 \times 10^7\,J\,kg^{-1}$ proporcionamos mucha más información.

Diferencia de potencial, d.p.

Aunque es importante comprender el concepto de potencial, normalmente nos interesa más conocer la *diferencia* entre el potencial de dos lugares (**diferencia de potencial**) que el potencial real en una ubicación determinada.

La diferencia de potencial, ΔV, entre dos puntos es el trabajo realizado, W, cuando se desplaza una unidad de masa (o una unidad positiva de carga) entre estos dos puntos.

$$\Delta V_g = \frac{W}{m}$$

o bien

$$\Delta V_e = \frac{W}{q}$$

El concepto de diferencia de potencial eléctrico ya lo hemos visto anteriormente cuando estudiamos los circuitos eléctricos (Capítulo 5). Entonces lo expresamos simplemente como $V = W/q$, pero en este capítulo estamos empleando el símbolo Δ para remarcar que nos estamos refiriendo a una diferencia de potencial y no a un potencial.

Estas ecuaciones figuran en el *Apéndice de datos de Física* en la forma:

$$W = m\Delta V_g$$
$$W = q\Delta V_e$$

Ejemplo resuelto

1 Los potenciales de dos puntos en un campo eléctrico son, respectivamente, 12,7 V y 15,3 V. ¿Cuánta energía se transfiere cuando un electrón se desplaza entre estos puntos:

a en J
b en eV?

a $W = q\Delta V_e = (1{,}6 \times 10^{-19}) \times (15{,}3 - 12{,}7) = 4{,}2 \times 10^{-19}$ J
b $15{,}3 - 12{,}7 = 2{,}6$ eV

1 Cuando una carga de 5,1 μC se desplaza desde un cierto punto a tierra (al suelo) se transfieren $4{,}9 \times 10^{-5}$ J de energía. ¿Cuál es la magnitud del potencial de este punto?

2 El potencial gravitatorio sobre la superficie de un planeta es $-4{,}8\,\text{MJ kg}^{-1}$. Calcula la energía potencial gravitatoria de una masa de 86 kg que está sobre el planeta.

3 El potencial gravitatorio a una altura de 500 km sobre la superficie de la Tierra es $-58{,}0\,\text{MJ kg}^{-1}$. ¿Cuánta energía potencial debemos transferir a una masa de 5000 kg que está sobre la superficie terrestre para elevarla a una órbita a esa altura?

4 Un satélite de 3760 kg de masa se encuentra en una órbita circular cuyo potencial es $-5{,}74 \times 10^7\,\text{J kg}^{-1}$.
a ¿Cuál sería el cambio en la energía potencial gravitatoria si el satélite se desplazara a una órbita cuyo potencial fuera $-6{,}00 \times 10^7\,\text{J kg}^{-1}$?
b ¿Tendría que alejarse de la Tierra o acercarse?

5 ¿Cuánta energía gana una carga global de 2 C cuando circula a través de una batería con una d.p. entre bornes de 12 V?

6 ¿Cuál es la diferencia de potencial gravitatorio entre el extremo superior y el inferior de un edificio de 24,5 m de altura?

7 Explica por qué «el infinito parece una elección más sensata para el cero del potencial gravitatorio que para el cero del potencial eléctrico».

8 Una carga de +4,5 C se desplaza desde un lugar donde el potencial es +0,23 V a otro lugar donde el potencial es −1,44 V.
a ¿Cuánta energía se transfiere?
b ¿El trabajo es realizado *sobre* la carga o *por* la carga?

9 Explica por qué no hay cambio en la energía potencial gravitatoria cuando una masa se desplaza horizontalmente sobre la superficie terrestre, o cuando un satélite describe una órbita circular alrededor de la Tierra.

Líneas de campo y superficies equipotenciales

Una línea de campo representa la dirección de la fuerza sobre una masa (o una carga positiva). Si las líneas de campo se aproximan significa que la intensidad del campo va en aumento.

Cuando dibujes las líneas de campo recuerda que no se pueden cruzar, porque eso querría decir que una fuerza puede actuar en dos direcciones a la vez.

Una **superficie equipotencial** (o una línea equipotencial) conecta lugares con el mismo potencial.

Equipotenciales gravitatorias

Normalmente cabe esperar que el potencial (o el campo) gravitatorio alrededor de una masa grande, como un planeta o una estrella, varíe. Este es otro de los motivos por los que el concepto de potencial es práctico: podemos dibujar «campos de energía» para representar la variación del potencial gravitatorio alrededor de planetas y cuerpos similares. En la Figura 10.4 se representan las *líneas equipotenciales* alrededor de un planeta esférico, que se comporta como una masa puntual.

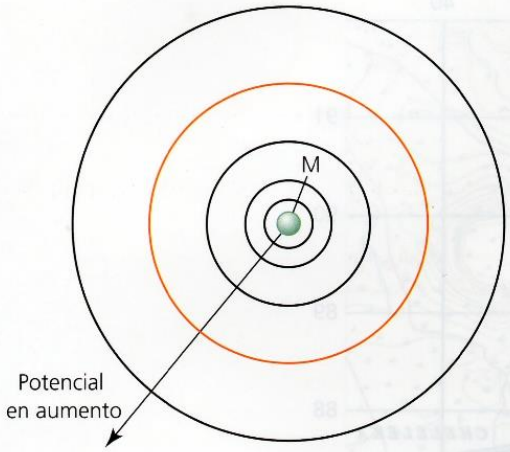


Figura 10.4
Líneas equipotenciales alrededor de una masa esférica

Por ejemplo, se necesita la misma cantidad de energía para llevar al infinito una masa determinada situada en *cualquier* punto de la línea equipotencial de color rojo, y no hace falta energía *neta* para desplazar la masa desde un punto cualquiera de la línea de color rojo a otro punto situado sobre la misma línea equipotencial. El potencial es una magnitud escalar, por tanto las líneas no llevan flechas.

La diferencia numérica en el potencial gravitatorio entre líneas equipotenciales sucesivas se mantiene constante, lo que significa que las líneas se separan cada vez más a medida que aumenta la distancia respecto a la masa (porque la intensidad del campo gravitatorio se hace cada vez más débil). En la Figura 10.4 se representa una situación tridimensional sobre un papel plano; en tres dimensiones, las superficies equipotenciales de este ejemplo serían esféricas.

En el Capítulo 6 estudiamos brevemente el uso de las líneas de campo para representar campos gravitatorios (y las líneas de campo magnéticas se utilizaron en el Capítulo 5). Los diagramas de líneas equipotenciales no aportan más información que las líneas de campo, pero sí representan otra manera de visualizar el mismo campo.

La fuerza sobre cualquier masa pequeña situada cerca de la masa grande, *M*, actúa en la Figura 10.4 *radialmente* hacia *M*, perpendicularmente a las líneas equipotenciales.

Las líneas de campo gravitatorias son siempre perpendiculares a las superficies equipotenciales y van orientadas desde el potencial más alto hacia el más bajo.

En la Figura 10.5a se representa un campo gravitatorio radial y en la Figura 10.5b un campo gravitatorio (casi) uniforme, como el de una habitación. El campo siempre es más intenso en los puntos donde las líneas de campo y las líneas equipotenciales están más próximas.

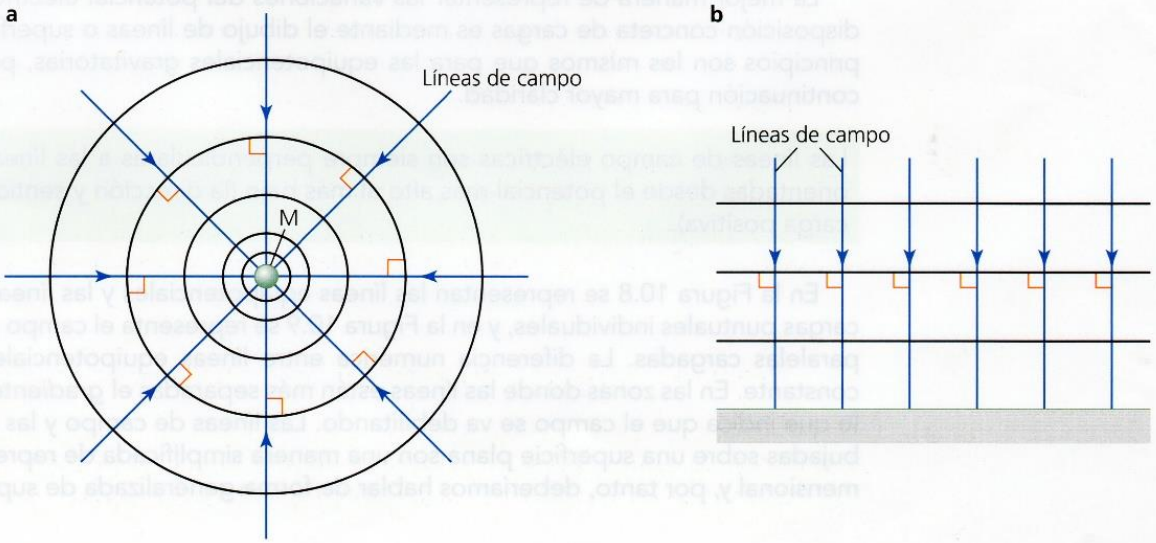


Figura 10.5
Las líneas equipotenciales y las líneas de campo son perpendiculares entre sí

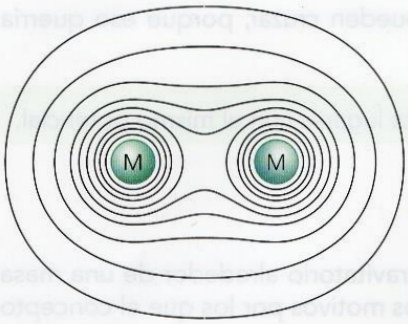


Figura 10.6
Líneas equipotenciales alrededor de dos masas iguales

La forma de las líneas equipotenciales alrededor de dos masas iguales se muestra en la Figura 10.6.

Las **curvas de nivel** que se representan en un mapa geográfico, como las de la Figura 10.7, desempeñan un papel equivalente al de las líneas equipotenciales. De hecho, *son* un tipo de línea equipotencial. Las curvas de nivel unen lugares que están a la misma altitud de manera que, mirando el mapa, sabemos en qué dirección nos tenemos que desplazar para subir de nivel (ganar energía gravitatoria), bajar de nivel o quedarnos en el mismo nivel. También sabemos que el terreno es más escarpado donde las líneas están más próximas, y que cualquier cosa que se pueda mover libremente, como un río, descenderá perpendicularmente a las curvas de nivel (líneas equipotenciales).

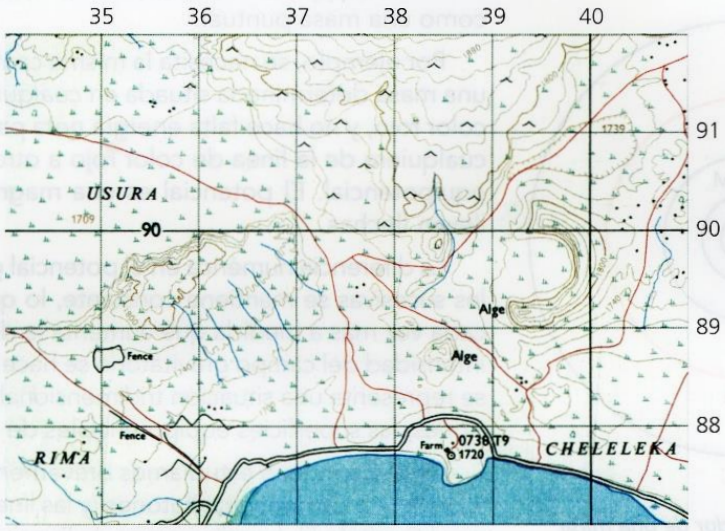


Figura 10.7
Curvas de nivel sobre un mapa

10 **a** Copia la Figura 10.6 y superpón las líneas de campo gravitatorias.
b Indica dónde es nula la intensidad del campo gravitatorio.

11 Dibuja esquemáticamente las líneas equipotenciales alrededor de dos masas que no son iguales, como por ejemplo la Tierra y la Luna.

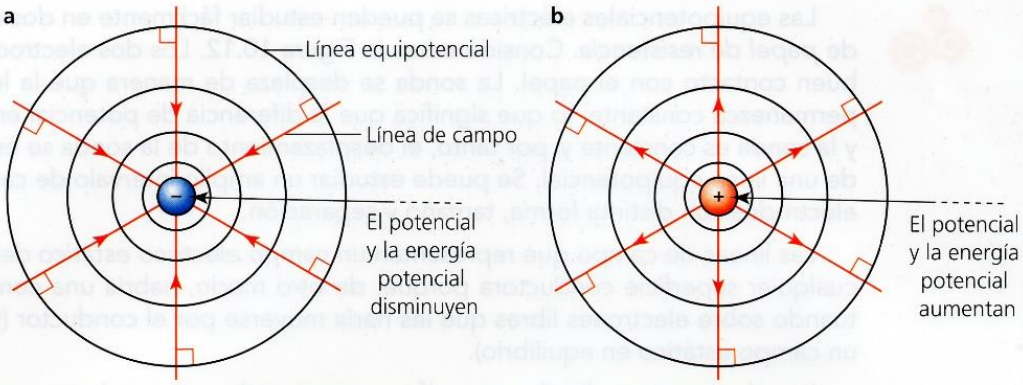
12 Averigua qué significa *geoide*.

Equipotenciales eléctricas

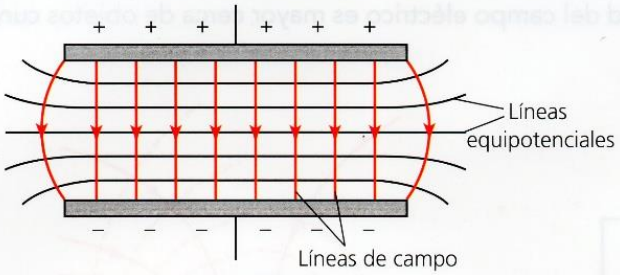
La mejor manera de representar las variaciones del potencial eléctrico alrededor de cualquier disposición concreta de cargas es mediante el dibujo de líneas o superficies equipotenciales. Los principios son los mismos que para las equipotenciales gravitatorias, pero los vamos a repetir a continuación para mayor claridad.

Las líneas de campo eléctricas son siempre perpendiculares a las líneas equipotenciales y van orientadas desde el potencial más alto al más bajo (la dirección y sentido de la fuerza sobre una carga positiva).

En la Figura 10.8 se representan las líneas equipotenciales y las líneas de campo alrededor de cargas puntuales individuales, y en la Figura 10.9 se representa el campo uniforme entre dos placas paralelas cargadas. La diferencia numérica entre líneas equipotenciales sucesivas se mantiene constante. En las zonas donde las líneas están más separadas el *gradiente del potencial* disminuye, lo que indica que el campo se va debilitando. Las líneas de campo y las líneas equipotenciales dibujadas sobre una superficie plana son una manera simplificada de representar una situación tridimensional y, por tanto, deberíamos hablar de forma generalizada de superficies equipotenciales.



■ **Figura 10.8**
Campo eléctrico y potencial alrededor de cargas puntuales

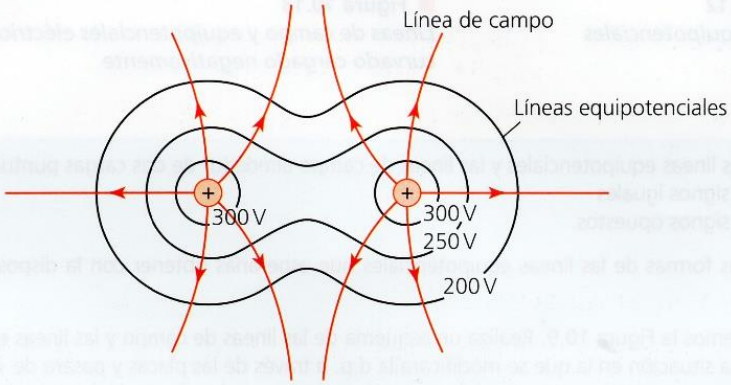


■ **Figura 10.9**
Campo y potencial en un campo uniforme

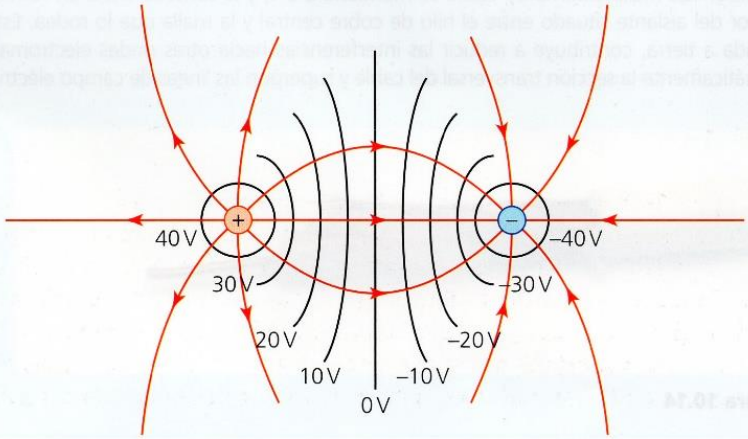
Por definición, cuando una carga se desplaza entre distintos lugares situados sobre la misma línea equipotencial no se transfiere energía neta.

En la Figura 10.10 se representan las líneas equipotenciales alrededor de dos cargas positivas del mismo módulo. Se han incluido además algunas líneas de campo.

En la Figura 10.11 se representan las líneas equipotenciales alrededor de dos cargas del mismo módulo y signos opuestos. (Un par de cargas iguales y de signos opuestos separadas por una distancia pequeña se denomina **dipolo**).



■ **Figura 10.10**
Equipotenciales alrededor de cargas puntuales iguales



■ **Figura 10.11**
Equipotenciales alrededor de un dipolo

Las equipotenciales eléctricas se pueden estudiar fácilmente en dos dimensiones si se dispone de *papel de resistencia*. Consideremos la Figura 10.12. Los dos electrodos de cobre deben hacer buen contacto con el papel. La sonda se desplaza de manera que la lectura sobre el voltímetro permanezca constante, lo que significa que la diferencia de potencial entre uno de los electrodos y la sonda es constante y, por tanto, el desplazamiento de la sonda se está produciendo a lo largo de una línea equipotencial. Se puede estudiar un amplio intervalo de campos eléctricos utilizando electrodos con distinta forma, tamaño y separación.

Las líneas de campo que representan un campo eléctrico *estático* deben ser perpendiculares a cualquier superficie conductora porque, de otro modo, habría una componente de la fuerza actuando sobre electrones libres que les haría moverse por el conductor (y entonces no tendríamos un campo estático en equilibrio).

Los electrones se distribuyen uniformemente sobre un conductor cargado plano, pero cuando la superficie es curva, tienden a concentrarse allí donde la superficie está más curvada. Esto significa que la intensidad del campo eléctrico es mayor cerca de objetos curvados y en punta (véase la Figura 10.13).

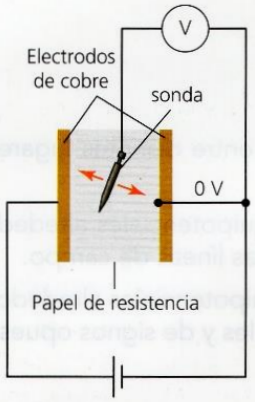


Figura 10.12
Estudio de equipotenciales

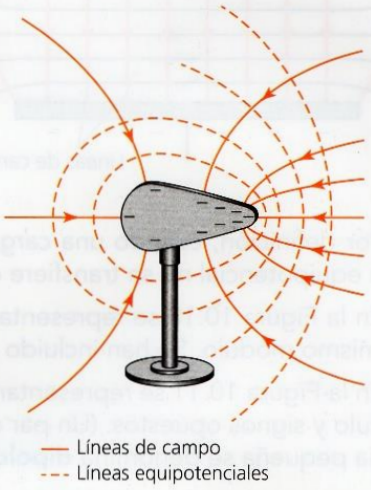


Figura 10.13
Líneas de campo y equipotenciales eléctricas cerca de un conductor curvado cargado negativamente

13 Esboza las líneas equipotenciales y las líneas de campo alrededor de dos cargas puntuales de distinta magnitud si
a tienen signos iguales
b tienen signos opuestos.

14 Esboza las formas de las líneas equipotenciales que esperarías obtener con la disposición experimental de la Figura 10.12.

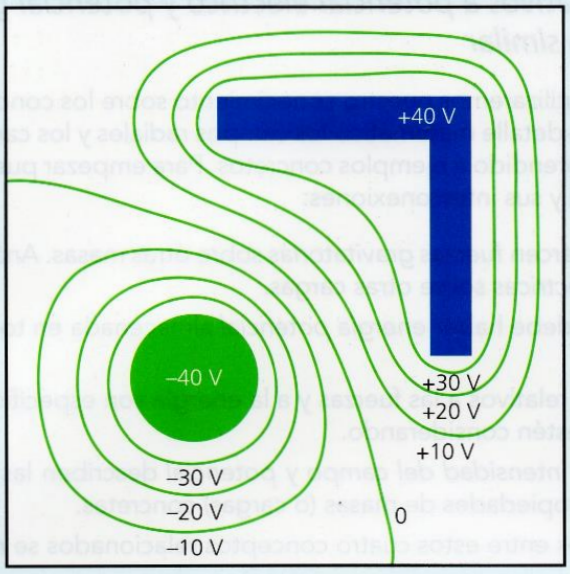
15 Consideremos la Figura 10.9. Realiza un esquema de las líneas de campo y las líneas equipotenciales que corresponderían a la situación en la que se modificara la d.p. a través de las placas y pasara de $+V$ a $-V/2$.

16 En la Figura 10.14 se muestra un tipo de cable coaxial que se utiliza ampliamente para transferir datos, como señales de televisión. La malla externa de cobre se mantiene a 0 V, y la señal se envía en forma de onda electromagnética en el interior del aislante situado entre el hilo de cobre central y la malla que lo rodea. Este diseño, con la malla externa conectada a tierra, contribuye a reducir las interferencias hacia otras ondas electromagnéticas o desde estas. Dibuja esquemáticamente la sección transversal del cable y superpón las líneas de campo eléctricas y las líneas equipotenciales.



Figura 10.14

17 En la Figura 10.15 se representa la variación de potencial entre dos conductores. Esboza el diagrama del campo eléctrico correspondiente a esta disposición.



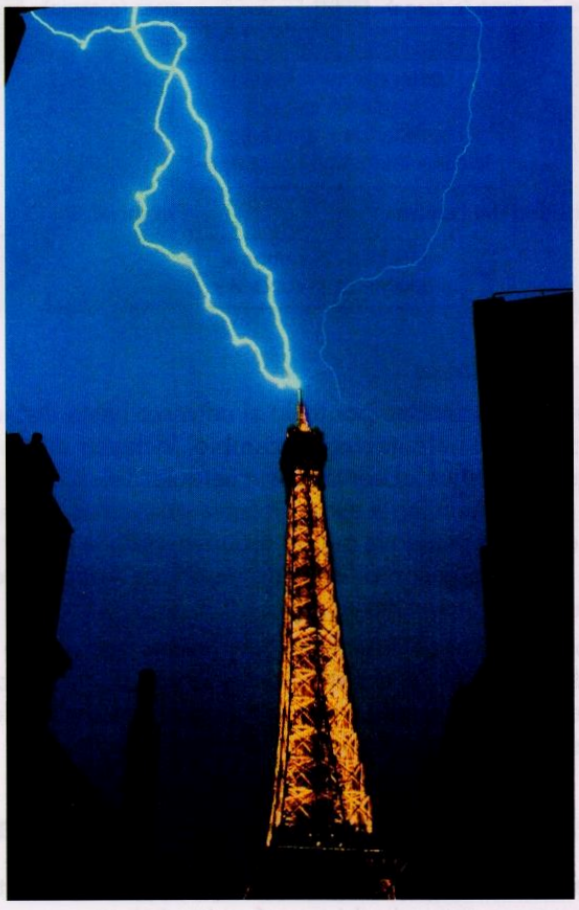
■ **Figura 10.15**

18 Dibuja esquemáticamente las líneas de campo eléctrico entre una nube cargada positivamente y una zona de terreno plano con un único árbol alto en su interior.

Aplicaciones

Campos eléctricos y pararrayos

Un pararrayos es un objeto metálico largo y puntiagudo que se fija (con la punta orientada hacia arriba) en la parte superior de una estructura elevada o expuesta, como por ejemplo un edificio, un puente o una estatua (Figura 10.16). El pararrayos está conectado a tierra mediante un cable grueso de cobre que baja por el lateral de la estructura. Los modelos más simples de pararrayos consisten en varillas metálicas, pero existen muchos modelos disponibles, desde los diseños decorativos hasta los más discretos.



■ **Figura 10.16**
La torre Eiffel debe estar protegida por un pararrayos

El rayo impacta contra el pararrayos en lugar de hacerlo contra la estructura, y las corrientes eléctricas de alta intensidad circulan hasta el suelo sin peligro para la estructura o las personas que habitan en su interior o en los alrededores.

La forma puntiaguda del pararrayos favorece el aumento del campo eléctrico a su alrededor y contribuye a ionizar el aire, ofreciendo así una trayectoria de conducción para el rayo, aunque la importancia de este proceso todavía no se comprende del todo.

1 Investiga cuáles son los efectos que puede tener el impacto de un rayo sobre un avión y cómo se pueden minimizar.

10.2 Los campos en la práctica

Los problemas relativos a potencial eléctrico y potencial gravitatorio se pueden abordar de forma similar

En este apartado utilizaremos nuestro conocimiento sobre los conceptos relativos a los campos para estudiar con más detalle matemático los campos radiales y los campos uniformes. A continuación aplicaremos lo aprendido a ejemplos concretos. Para empezar puede ser útil resumir los cuatro conceptos principales y sus interconexiones:

- Todas las masas ejercen *fuerzas gravitatorias* sobre otras masas. Análogamente, todas las cargas ejercen *fuerzas eléctricas* sobre otras cargas.
- Esto significa que debe haber *energía potencial* almacenada en todas las disposiciones de cargas o masas.
- Todos los cálculos relativos a las fuerzas y a la energía son específicos para las masas (o cargas) concretas que se estén considerando.
- Los conceptos de *intensidad del campo* y *potencial* describen las propiedades de puntos del espacio y no las propiedades de masas (o cargas) concretas.
- Las interconexiones entre estos cuatro conceptos relacionados se muestran en la Figura 10.17.

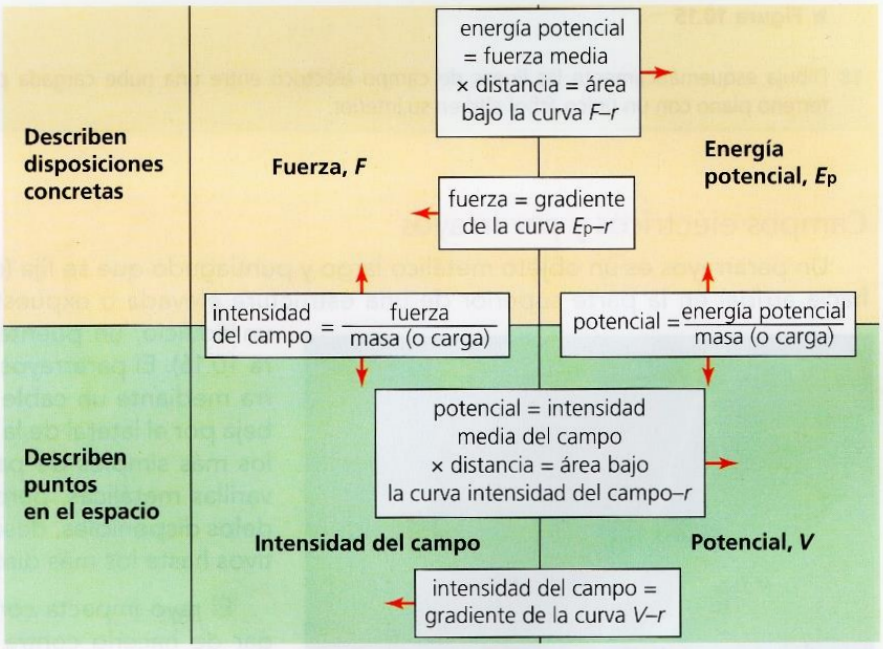


Figura 10.17 *Ecuaciones que relacionan las magnitudes relativas a los campos*

Naturaleza de la ciencia

Comunicación con los no científicos

Los campos gravitatorios se extienden por todo el universo hasta distancias inimaginablemente lejanas. Los efectos de los campos eléctricos, en cambio, incluyen distancias subatómicas mucho más pequeñas que las que podemos observar con cualquier telescopio (véase la Tabla 1.5 de la página 5). Los científicos que se dedican a estos ámbitos poseen un conocimiento especializado y están muy familiarizados con la escala en la que se mueven, pero la mayoría del público en general sabe muy poco de estos temas, que son difíciles de visualizar. Además, los conceptos que se trabajan en este capítulo tienen fama de difíciles.

Los científicos y las organizaciones científicas no pueden trabajar de forma aislada, sino que tienen la responsabilidad de comunicar el extracto de su trabajo, no solo a los demás científicos, sino también al público en general. Para ello se requieren habilidades de comunicación que son muy distintas de las que se utilizan en el trabajo diario de un científico.

Fuerzas y ley del inverso del cuadrado de la distancia: campos radiales

Los *campos radiales* alrededor de masas (o cargas) puntuales son los tipos de campo más elementales. Es muy importante comprender bien su funcionamiento porque el resto de campos se pueden entender como la combinación de muchos campos radiales. Recordemos también que las masas esféricas y los conductores cargados esféricos se comportan como si toda su masa (o carga) estuviera concentrada en los centros de las esferas (visto desde fuera de estas).

Fuerzas

Ya sabemos que las fuerzas gravitatorias y eléctricas entre puntos se describen mediante las ecuaciones siguientes, que figuran en el *Apéndice de datos de Física*:

$$F_G = G\frac{Mm}{r^2}$$ (Ley de gravitación de Newton, que a veces se escribe como $F_G = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$)

$$F_E = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$ (Ley de Coulomb)

Cuando multiplicamos dos cargas eléctricas del mismo signo, el resultado es una fuerza positiva, lo que significa una repulsión. La dirección y sentido de actuación de la fuerza da lugar a la separación cada vez mayor de las cargas. Cuando multiplicamos una carga positiva por una carga negativa, el resultado es una fuerza negativa, lo que significa una atracción.

Por consistencia, deberíamos considerar que la ecuación para las fuerzas gravitatorias debería llevar también un signo negativo. Sin embargo, se suele considerar innecesario y se omite, ya que las fuerzas gravitatorias son siempre atractivas y solo nos interesa la magnitud de la fuerza.

Podemos ver una representación gráfica de una ley de atracción (gravitatoria) que se comporta como el inverso del cuadrado de la distancia en la Figura 10.19.

Enlace con la teoría del conocimiento

¿Hay alguna diferencia entre despreciable y cero?

Aunque las fuerzas gravitatoria y electrostática disminuyen según el inverso del cuadrado de la distancia y solo toman el valor cero cuando la separación es infinita, desde un punto de vista práctico son despreciables a distancias mucho menores. ¿Cómo deciden los científicos cuándo un efecto es lo bastante pequeño como para ser ignorado?

Despreciable significa demasiado pequeño para ser significativo, aunque en este contexto despreciable también implica demasiado pequeño para ser medido utilizando la tecnología actual. Puede ser razonable asumir que un efecto es despreciable para una aplicación concreta de una teoría sin que la teoría básica deba modificarse.

Intensidad del campo

Sabemos que, en general, $g = F_G/m$ y $E = F_E/q$, por tanto las ecuaciones para las intensidades de los campos radiales alrededor de puntos son simplemente:

$$g = \frac{F_G}{m} = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$E = \frac{F_E}{q} = k\frac{q_1 q_2 / r^2}{q}$$

q_1 y q_2 son intercambiables en esta expresión y cuando estudiamos el campo alrededor de una carga puntual individual podemos utilizar simplemente q.

Eliminando q entre el numerador y el denominador obtenemos:

$$g = G\frac{M}{r^2}$$

$$E = k\frac{q}{r^2}$$

La ecuación para la intensidad del campo gravitatorio figura en el *Apéndice de datos de Física* (para el Capítulo 6). La ecuación para la intensidad del campo eléctrico *no* figura en el *Apéndice de datos de Física*.

En la Figura 10.18 se representa la variación de la intensidad del campo gravitatorio alrededor de la Tierra. El campo *en el interior* de la Tierra *disminuye* a medida que aumenta la distancia bajo la superficie.

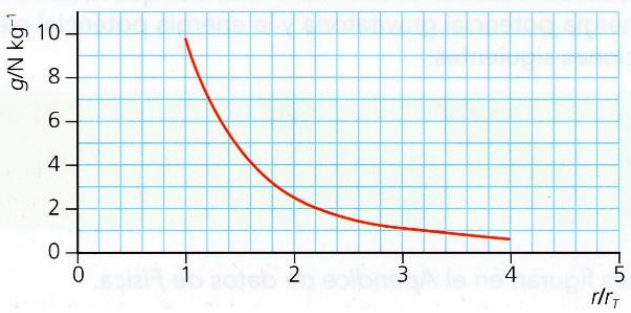


Figura 10.18 *Intensidad del campo gravitatorio sobre la superficie de la Tierra (radio r_T)*

19 Si la intensidad del campo eléctrico a 34 cm del centro de una esfera cargada de radio 10 cm es $-6{,}0\ \mathrm{NC^{-1}}$, ¿cuál es la carga sobre la esfera?

20 Representa gráficamente la intensidad del campo eléctrico alrededor de una esfera metálica aislada de radio 10 cm si hay una carga de +2,6 nC sobre su superficie.

21 **a** La intensidad del campo gravitatorio sobre la superficie del planeta Venus es $8{,}9\ \mathrm{Nkg^{-1}}$. Calcula la masa de Venus si su diámetro es de 12 100 km.

b ¿Cuál sería el peso de una nave espacial de 5000 kg situada a 6050 km sobre la superficie de Venus?

22 El área bajo una curva intensidad del campo – distancia, entre el infinito y una distancia determinada equivale al potencial en ese punto. Utiliza la Figura 10.18 para estimar el potencial gravitatorio sobre la superficie terrestre ($r_T = 6{,}4 \times 10^6$ m).

23 Sugiere razones por las que:

a la intensidad del campo gravitatorio en el interior de la Tierra es inferior a $9{,}8\ \mathrm{Nkg^{-1}}$

b la intensidad del campo en el centro de la Tierra es cero.

Potencial y energía potencial

Energía potencial, E_p

En la Figura 10.19 se representa una variación entre dos puntos de una fuerza atractiva que es proporcional a $1/r^2$. El área sombreada, entre $r = r_0$ y r = infinito, es igual al trabajo realizado para traer una masa (o carga) desde el infinito hasta una distancia r_0 de la masa (o carga) puntual (o del centro de la esfera). (El trabajo lo realiza el campo porque la fuerza es atractiva).

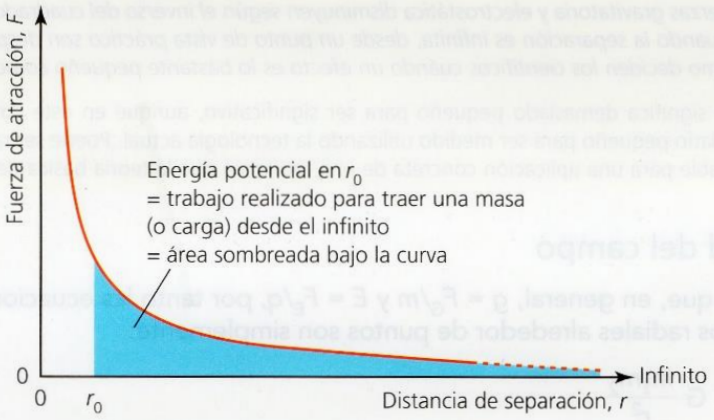


Figura 10.19 *Gráfica fuerza-distancia para una relación según el inverso del cuadrado de la distancia*

24 La fuerza gravitatoria (peso) que actúa sobre una masa de 20 kg que se encuentra sobre la superficie del planeta Marte es 74 N. El radio de Marte es 3400 km.

a Calcula la masa de Marte.

b Dibuja una gráfica fuerza-distancia para esta masa hasta una distancia de 2×10^4 km (por lo menos) del centro de Marte.

c Utiliza tu gráfica para estimar la energía potencial gravitatoria de la masa cuando se encuentra sobre la superficie de Marte.

25 En la Figura 10.20 se representa la variación de la fuerza que actúa sobre una carga puntual de –73 pC cuando se aleja de una esfera cargada.

a Determina la carga sobre la esfera.

b Utiliza la gráfica para estimar la energía potencial de la carga puntual cuando se encuentra a 5 cm del centro de la esfera.

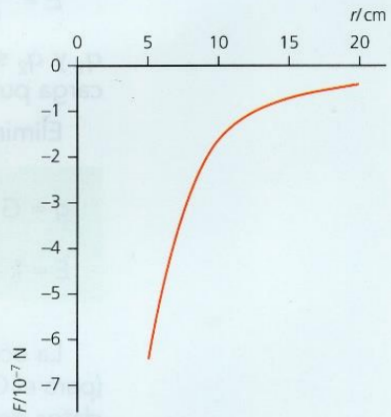


Figura 10.20

Indudablemente, utilizar ecuaciones es mucho más fácil que medir áreas bajo curvas. Se puede demostrar que la energía potencial gravitatoria y la energía potencial eléctrica se pueden calcular a partir de las ecuaciones siguientes:

$$E_p = -G\frac{Mm}{r}$$

$$E_p = k\frac{q_1 q_2}{r}$$

Ambas ecuaciones figuran en el *Apéndice de datos de Física*.

Recordatorio: el signo negativo de la ecuación gravitatoria representa el hecho de que el cero de la energía potencial está en el infinito y que las fuerzas gravitatorias son siempre atractivas. El signo de la energía potencial eléctrica depende de los signos de las dos cargas.

En la Figura 10.21 se representa la variación de la energía potencial gravitatoria (proporcional a $1/r$) de una masa (de prueba) alrededor de una masa puntual. El gradiente en cualquier punto equivale al módulo de la fuerza a esa distancia. La gráfica de la energía potencial para dos cargas puntuales de signos opuestos es similar. En el caso de dos cargas del mismo signo, la energía potencial es positiva porque hay una fuerza repulsiva entre ellas.

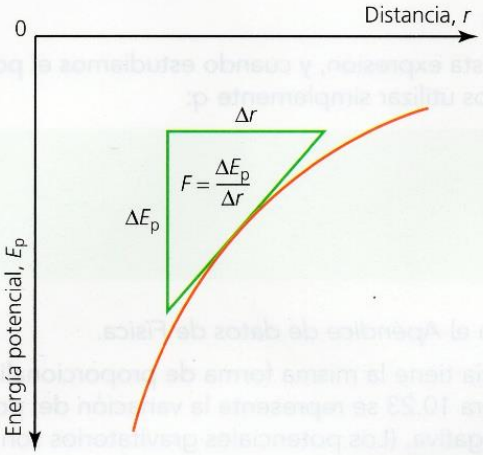


Figura 10.21
Gráfica de la energía potencial en función de la distancia para una fuerza de un campo que sigue una ley del inverso del cuadrado de la distancia

Ejemplo resuelto

2 **a** Calcula el valor de la energía potencial gravitatoria de una nave espacial de 2 000 kg que se encuentra a 100 km sobre la superficie de la Luna. (masa de la Luna = $7{,}35 \times 10^{22}$ kg; radio de la Luna = 1 740 km)

b Explica por qué en realidad su energía potencial es mayor.

a $E_p = \dfrac{-GMm}{r} = \dfrac{(-6{,}67 \times 10^{-11}) \times (7{,}35 \times 10^{22}) \times 2\,000}{1{,}84 \times 10^{6}} = 5{,}30 \times 10^{9}\,\text{J}$

b Se ha ignorado el efecto del campo gravitatorio terrestre.

26 En la Figura 10.22 se representa la variación de la energía potencial gravitatoria de una nave espacial cercana a un planeta.

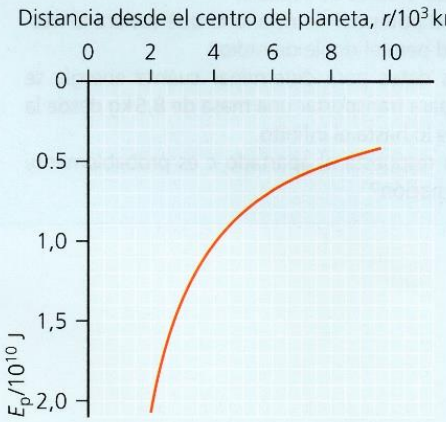


Figura 10.22

a Utiliza el gradiente de la curva para determinar el módulo de la fuerza sobre la nave espacial cuando se encuentra a 4 000 km del centro del planeta.

b Estima la energía potencial de la nave espacial si se encuentra a $1{,}0 \times 10^{5}$ km del centro del planeta.

27 Las superficies de dos esferas con cargas idénticas están separadas 12 cm. Si el radio de cada esfera es 2,8 cm y la energía potencial eléctrica de la disposición es $+3{,}6 \times 10^{-8}$ J, ¿cuál es la carga de cada esfera?

28 Estima la energía potencial gravitatoria almacenada en el sistema Sol-Tierra (busca los datos necesarios).

Potencial, V

En general hemos definido los potenciales como $V_g = E_P/m$ y $V_e = E_P/q$. En particular, para campos radiales:

$$V_g = \frac{-(GMm/r)}{m}$$

y

$$V_e = \frac{(kq_1q_2/r)}{q_1}$$

q_1 y q_2 son intercambiables en esta expresión, y cuando estudiamos el potencial alrededor de una carga puntual individual podemos utilizar simplemente q:

$$V_g = -\frac{GM}{r}$$

$$V_e = \frac{kq}{r}$$

Ambas ecuaciones figuran en el *Apéndice de datos de Física*.

Una gráfica potencial-distancia tiene la misma forma de proporcionalidad inversa que una gráfica energía-distancia. En la Figura 10.23 se representa la variación del potencial alrededor de una carga positiva y de una carga negativa. (Los potenciales gravitatorios son siempre negativos).

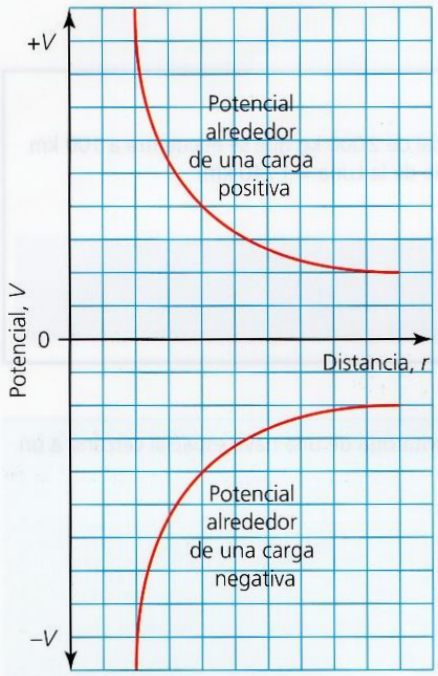


Figura 10.23
Variación del potencial alrededor de una carga

29 **a** Explica qué queremos decir exactamente cuando afirmamos que el potencial gravitatorio sobre la superficie terrestre es $-6{,}25 \times 10^7\,J\,kg^{-1}$ (a una distancia r de su centro).
b Calcula el potencial gravitatorio en los puntos P, Q y R de la Figura 10.24.
c ¿Cuánta energía potencial gravitatoria hemos tenido que suministrar a una nave espacial de 2420 kg para desplazarla desde Q a R?

30 Utiliza una hoja de cálculo para calcular el potencial gravitatorio a diferentes distancias del centro de la Tierra (cada 10000 km desde cero a 100000 km). Utiliza el programa de ordenador para generar una gráfica de los resultados.

31 Io es una de las lunas del planeta Júpiter. Su radio es 1820 km y su masa es de $8{,}9 \times 10^{22}$ kg.
a ¿Cuál es el potencial gravitatorio sobre la superficie de Io? (Ignora los efectos de Júpiter).
b ¿Cuál sería el potencial de otra luna que tuviera la misma densidad pero el doble de radio?
c Utiliza estos datos para determinar cuánta energía se necesitaría para transportar una masa de 8,5 kg desde la superficie de Io hasta el infinito.
d ¿Por qué tu respuesta al apartado **c** es probablemente una subestimación?

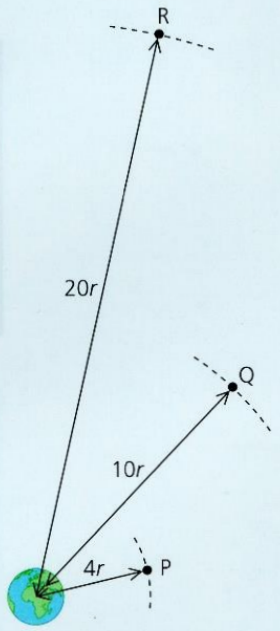


Figura 10.24

32 ¿Cuál es el potencial eléctrico a una distancia de 12,6 cm de una carga puntual de 60 μC?

33 ¿Cuál es el potencial eléctrico a 10^{-10} m de una carga positiva de $1,6 \times 10^{-19}$ C? (Esta es aproximadamente la distancia entre el núcleo y el electrón en un átomo de hidrógeno).

34 Una esfera conductora de radio 2,5 cm tiene una carga de −76 nC. ¿A qué distancia de su superficie el potencial será de −1 000 V?

Resumen de las ecuaciones para campos radiales

En la Figura 10.25 se muestran las ecuaciones para los conceptos clave de los campos radiales. Consulta la Figura 10.17 como recordatorio de la interconexión entre los distintos conceptos. Siete de estas ocho ecuaciones se pueden encontrar en el *Apéndice de datos de Física*, pero la ecuación para la intensidad del campo eléctrico no se incluye.

Figura 10.25 *Ecuaciones para los campos gravitatorios radiales (en azul) y los campos eléctricos radiales (en rojo)*

Fuerza	Energía potencial
$F_G = G\frac{Mm}{r^2}$ $\left(\text{o } F_G = G\frac{m_1 m_2}{r_2}\right)$ $F_E = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$	$E_p = -\frac{GMm}{r}$ $E_p = \frac{kq_1 q_2}{r}$
Campo	**Potencial**
$g = \frac{GM}{r^2}$ $E = \frac{kq}{r^2}$	$V_g = -\frac{GM}{r}$ $V_e = \frac{kq}{r}$

Gradiente del potencial e intensidad del campo

El módulo del gradiente de cualquier curva potencial-distancia para un campo radial, ($\Delta(GM/r)/\Delta r$ o $\Delta(kq/r)/\Delta r$), equivale al módulo de la intensidad del campo en ese punto, aunque las ecuaciones siguientes se aplican igualmente a cualquier campo:

$$g = -\frac{\Delta V_g}{\Delta r}$$

$$E = -\frac{\Delta V_e}{\Delta r}$$

Estas ecuaciones figuran en el *Apéndice de datos de Física*.

Al expresar la intensidad del campo mediante la ecuación anterior, podemos ver que el $V\,m^{-1}$ es una unidad alternativa (equivalente al $N\,C^{-1}$).

$\frac{\Delta V}{\Delta r}$ se conoce como el **gradiente del potencial**.
La intensidad del campo es igual en módulo al gradiente del potencial.

Como ya explicamos en el Capítulo 5, la determinación de la intensidad del campo eléctrico a partir de medidas de fuerza y carga ($E = F/q$) es difícil desde el punto de vista experimental, pero la determinación a partir del gradiente del potencial ($E = -\Delta V_e/\Delta r$) es mucho más fácil, especialmente si el campo es uniforme (véase abajo), ya que en este caso solo se necesita un voltímetro y una regla.

En la Figura 10.26 se representa un ejemplo de la variación del potencial gravitatorio alrededor de un planeta. Se puede calcular el valor del potencial del campo para cualquier distancia (por ejemplo en R) a partir del gradiente de la curva en ese punto.

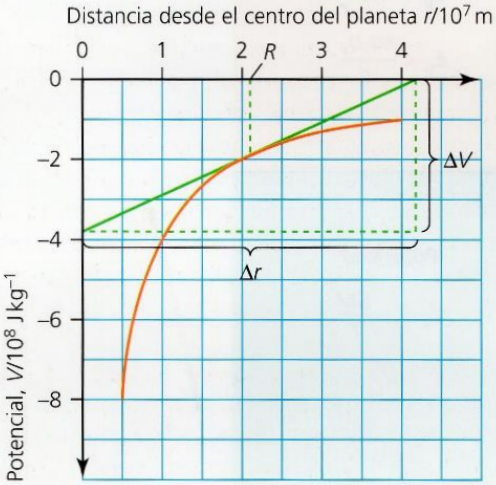


Figura 10.26
Gráfica en la que se representa la variación del potencial gravitatorio alrededor de un planeta

35 Observa la Figura 10.26. Determina la intensidad del campo gravitatorio a una distancia de $1{,}5 \times 10^7$ m desde el centro del planeta.

36 En la Figura 10.27 se representa la variación del potencial eléctrico con la distancia, *r*, desde un punto concreto, P.

a ¿Dónde se produce un mínimo de la intensidad del campo eléctrico?

b Determina la intensidad del campo:

i a 12 cm de P

ii a 32 cm de P.

c Sugiere qué disposición de cargas produciría esta variación en el potencial.

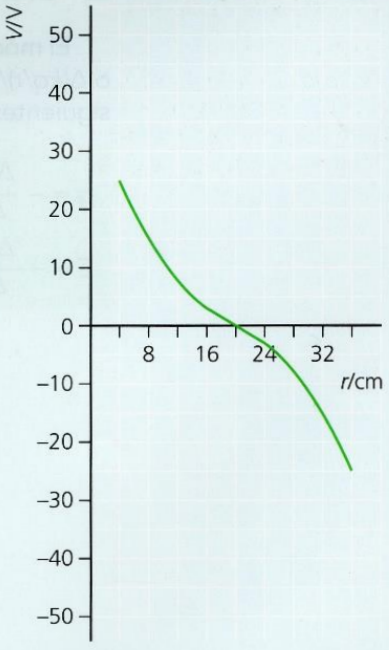


Figura 10.27



Figura 10.28
Esfera metálica hueca cargada negativamente

Campo y potencial en el interior de una esfera hueca cargada

Si una esfera metálica hueca está cargada, las fuerzas entre las cargas tienden a separarse tanto como sea posible. Como consecuencia, la carga se acumula en la superficie *exterior* de la esfera (o de cualquier otro conductor hueco con la forma que sea). Como el interior está descargado, el campo eléctrico en el *interior* de la esfera es nulo (Figura 10.28).

Un campo eléctrico nulo en el interior de una esfera conductora significa que el gradiente del potencial es también nulo y, por tanto, que el potencial es constante en el interior de la esfera y por todo el conductor.

Si hubiera diferencia de potencial en algún punto, las cargas experimentarían fuerzas y se desplazarían, de manera que desaparecería cualquier d.p.

Aplicaciones

Conductores huecos: jaula de Faraday



Figura 10.29
En esta jaula de Faraday se pueden observar chispas en el exterior, mientras que la persona que hay en su interior no sufre daño alguno

Si se aplica un campo eléctrico *constante* a un conductor metálico que rodea un espacio, los electrones libres se distribuyen muy rápidamente sobre la superficie exterior en función de la intensidad, la dirección y el sentido del campo, además de la forma del conductor. En un conductor esférico la distribución de carga es uniforme por toda la superficie. No es necesario que el conductor sea sólido, de hecho una malla o «jaula» funciona exactamente igual. La superficie interior permanecerá descargada y no habrá campo eléctrico o *diferencia* de potencial en el interior de la jaula. En la Figura 10.29 se muestra un espectacular ejemplo de jaula de «Faraday».

El lugar más seguro para resguardarse de una tormenta eléctrica es en el interior de un conductor, como un coche o un edificio (que normalmente dispone de un pararrayos si está en una ubicación expuesta). Los equipos electrónicos se pueden proteger colocándolos en el interior de una jaula de Faraday.

A los campos eléctricos y magnéticos *oscilatorios* de las ondas electromagnéticas se les pueden aplicar ideas similares, pero la situación es más compleja. El espacio en el interior de la jaula está libre de radiación electromagnética hasta cierto punto, en función de diversos factores, entre los que se encuentran la longitud de onda de la radiación, el tamaño de los orificios de la jaula, y el material, espesor, tamaño y forma de la jaula. El *apantallamiento electromagnético* se usa de forma generalizada para proteger los equipos importantes de las ondas electromagnéticas externas y para detener la emisión de señales electromagnéticas.

1 Investiga hasta qué punto se puede reducir la señal emitida o recibida por un teléfono móvil, o la efectividad de un control remoto, por el hecho de colocarlos en el interior de conductores metálicos con orificios o sin ellos (por ejemplo, un horno microondas *desconectado*, una malla metálica, papel de aluminio...)

Campos uniformes

Gravitatorios

Los campos gravitatorios que rodean los planetas, como la Tierra, tienen naturaleza radial, por tanto, suponer un campo gravitatorio uniforme no representa la realidad. No obstante, para la mayoría de las situaciones de la vida diaria sobre la superficie terrestre, podemos asumir que estamos sometidos a un campo gravitatorio constante (Figura 10.5b). Así, podemos utilizar $g \approx 9{,}8\ \text{N kg}^{-1}$ en cualquier punto de nuestro planeta. Medidas muy precisas de la intensidad del campo gravitatorio indican que existen ligeras variaciones en el valor de g a causa de diversos factores, entre los que se encuentra la densidad de las rocas cercanas.

Eléctricos

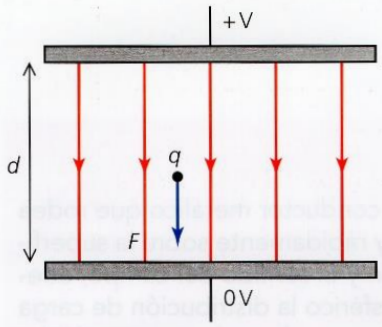


Figura 10.30
Fuerza sobre una carga en un campo eléctrico uniforme

Los campos eléctricos uniformes son importantes y se pueden generar fácilmente conectando una diferencia de potencial a través de dos placas conductoras paralelas (Figura 10.9). La d.p. obliga a los electrones a salir de una de las placas e ir hacia la otra (se explica con mucho mayor detalle en el Capítulo 11). Las cargas se distribuyen uniformemente sobre las placas, lo que genera un campo eléctrico uniforme entre ellas. Más allá de los límites de las placas, la intensidad del campo se reduce, lo que se conoce como *efecto del borde*.

En la Figura 10.30 se representa una carga q entre dos placas separadas una distancia d. Cuando se aplica una diferencia de potencial, V, entre las placas, la carga experimenta una fuerza F. Esta fuerza es constante en cualquier punto entre las placas (porque el campo es uniforme) y la carga se acelera a lo largo de una línea de campo.

el trabajo realizado (fuerza × distancia) para desplazar la carga desde una placa a la otra = diferencia de potencial × carga (definición de d.p.)

$$Fd = Vq$$

O bien, $F/q = V/d$, y como la intensidad del campo eléctrico se define como F/q:

la intensidad de un campo eléctrico uniforme entre placas paralelas, $E = \dfrac{V}{d}$

Esta ecuación *no* figura en el *Apéndice de datos de Física* porque es un ejemplo particular de la afirmación más general intensidad del campo = gradiente del potencial ($E = -\Delta V_e/\Delta r$).

Ejemplo resuelto

3 Una partícula beta negativa se mueve perpendicularmente al campo eléctrico uniforme generado por una d.p. de 5 000 V a través de dos placas metálicas paralelas separadas una distancia vertical de 5 cm.
a ¿Cuál es el módulo del campo eléctrico entre las placas?
b ¿Cuál es el módulo de la fuerza sobre la partícula beta?
c Describe el movimiento de la partícula entre las placas.
d Calcula la aceleración de la partícula beta entre las placas (masa del electrón = $9{,}1 \times 10^{-31}$ kg).

a $E = \dfrac{V}{d} = \dfrac{5\,000}{0{,}050} = 1{,}0 \times 10^5\ \text{V m}^{-1}$

b $F = Eq = (1{,}0 \times 10^5) \times (1{,}6 \times 10^{-19}) = 1{,}6 \times 10^{-14}$ N

c La componente horizontal de la velocidad del electrón no se verá afectada, pero el electrón será acelerado verticalmente por la fuerza. La combinación dará lugar a una trayectoria parabólica.

d $a = \dfrac{F}{m} = \dfrac{1{,}6 \times 10^{-14}\text{N}}{9{,}1 \times 10^{-31}} = 1{,}8 \times 10^{16}\ \text{m s}^{-2}$

37 Vivimos bajo la acción de un campo gravitatorio *radial*, por tanto, explica cómo podemos suponer que la intensidad del campo gravitatorio sobre la Tierra es aproximadamente *constante*.

38 Sugiere tres motivos por los que la intensidad del campo gravitatorio varía ligeramente entre distintas ubicaciones sobre la superficie terrestre.

39 Explica por qué es razonable asumir que la intensidad del campo eléctrico en los bordes de un campo uniforme entre placas paralelas es aproximadamente la mitad de la intensidad del campo en el centro.

40 **a** ¿Qué voltaje hay que aplicar entre dos placas metálicas paralelas separadas 1,5 cm para generar una intensidad del campo eléctrico entre ellas de $3{,}8 \times 10^4\ \mathrm{V\,m^{-1}}$?

b ¿Qué carga situada en este campo experimenta una fuerza de $1{,}0 \times 10^{-3}$ N?

41 Si el campo eléctrico uniforme necesario para provocar una descarga disruptiva en aire seco es como mínimo $2{,}9 \times 10^6\ \mathrm{V\,m^{-1}}$, estima el voltaje necesario para provocar un chispazo entre placas paralelas separadas 2 mm.

42 Considera las líneas equipotenciales del campo eléctrico uniforme entre dos placas paralelas que se representa en la Figura 10.31.

a Determina la intensidad del campo eléctrico.

b Si se sitúa una carga de $+7{,}8 \times 10^{-7}$ C en el punto A, ¿qué fuerza experimenta?

c ¿Cuál es la dirección y el sentido de esa fuerza?

d ¿Cuál es la diferencia de potencial entre los puntos A y B?

e ¿Cuánto trabajo se realiza si la carga se desplaza desde A hasta B?

f ¿Qué le sucede a la carga mientras se desplaza entre A y B?

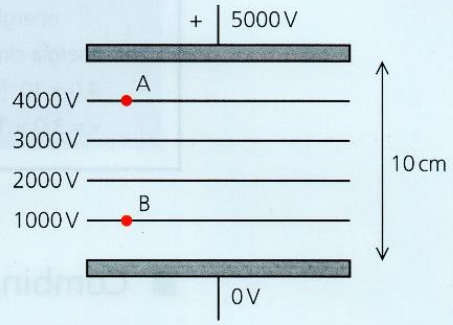


Figura 10.31

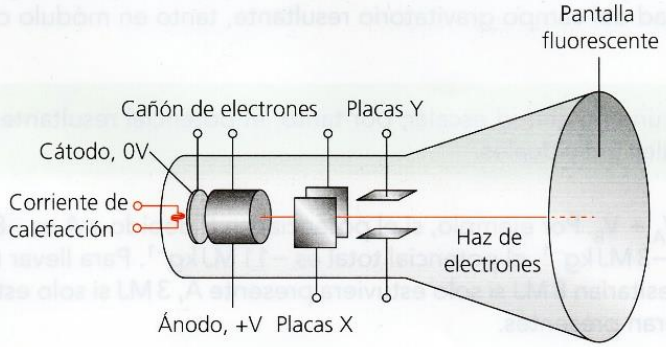
Uso de campos eléctricos para producir haces de partículas cargadas

Los campos eléctricos se usan ampliamente para acelerar partículas cargadas, como electrones, protones e iones. Algunos de los ejemplos de este uso (muchos de ellos incluidos en este curso) son:

- haces de electrones utilizados en los experimentos de difracción y dispersión
- osciloscopios que utilizan «rayos catódicos»
- espectrómetros de masas
- haces de alta energía utilizados en experimentos de física nuclear
- producción de rayos X (véase Opción C).

En la Figura 10.32 tenemos un ejemplo de control de haces de partículas mediante campos eléctricos. Podemos ver un tipo de tubo de recorrido electrónico dirigido que se usa frecuentemente para demostrar la producción y las propiedades de los haces de electrones. El cátodo se calienta mediante un cable activo al que está conectado, y emite electrones (un proceso que se conoce como *emisión termiónica*). Los electrones se aceleran en el campo eléctrico generado por un alto voltaje conectado entre el cátodo y el ánodo positivo, y forman un haz a medida que atraviesan a alta velocidad el tubo *evacuado* (en el que se ha hecho el vacío). Cuando el haz de electrones impacta contra una pantalla *fluorescente*, parte de su energía cinética se transfiere a un foco de luz visible.

Figura 10.32
Tubo de recorrido electrónico dirigido



Si se aplican diferencias de potencial a las placas X y/o las placas Y, los electrones experimentan fuerzas a medida que atraviesan los dos campos eléctricos uniformes. La variación de estas diferencias de potencial permite observar el desplazamiento del foco por la pantalla.

Ejemplo resuelto

4 **a** Para generar un haz de electrones se aplica un voltaje de 2 500 V a través de un «cañón de electrones». ¿Cuál es la energía cinética de cada uno de los electrones que emergen del cañón?

b ¿Cuál es la velocidad máxima de los electrones?

a 2 500 eV, suponiendo que se parte de una energía cinética cero, o bien:

energía = d.p. × carga $= 2500 \times (1{,}6 \times 10^{-19}) = 4{,}0 \times 10^{-16}$ J

b energía cinética = $\frac{1}{2}mv^2$

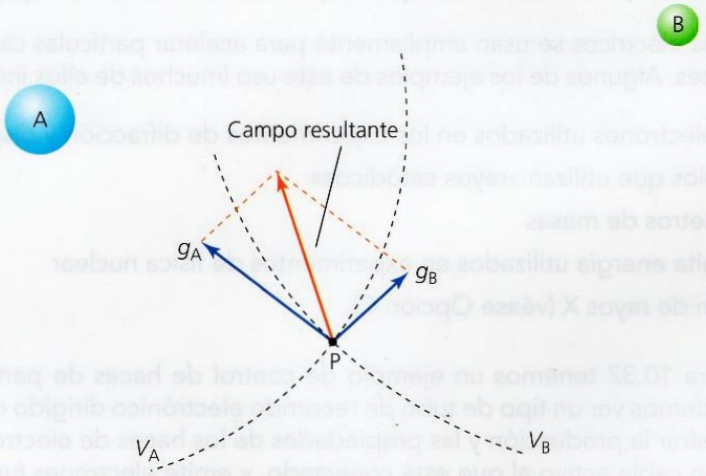
$4{,}0 \times 10^{-16} = 0{,}5 \times (9{,}1 \times 10^{-31}) \times v^2$

$v = 3{,}0 \times 10^{7}\,\text{m s}^{-1}$

Combinación de campos y potenciales

Consideremos en primer lugar un ejemplo gravitatorio: en la Figura 10.33 se representan dos planetas (o un planeta y una luna), A y B, y los potenciales y los campos que generan individualmente en el punto P.

Figura 10.33
Combinación de campos gravitatorios



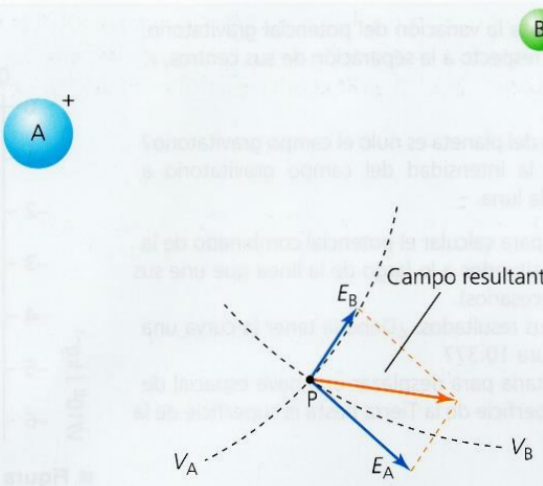
La intensidad del campo es una magnitud vectorial, por tanto, para determinar la resultante de ambos campos hay que efectuar una suma vectorial.

En la Figura 10.33 se ha efectuado esta suma dibujando un paralelogramo cuya diagonal representa la intensidad del campo gravitatorio resultante, tanto en módulo como en dirección y sentido.

El potencial es una magnitud escalar, por tanto, el potencial resultante en un punto es la suma de los potenciales individuales.

$V_{combinado} = V_A + V_B$. Por ejemplo, si el potencial en P debido a A es $-8\,\text{MJ kg}^{-1}$ y el potencial en P debido a B es $-3\,\text{MJ kg}^{-1}$, el potencial total es $-11\,\text{MJ kg}^{-1}$. Para llevar una masa de 1 kg desde P al infinito se necesitarían 8 MJ si solo estuviera presente A, 3 MJ si solo estuviera presente B y 11 MJ si ambos estuvieran presentes.

A los campos eléctricos se les pueden aplicar exactamente los mismos principios, pero recordemos que el potencial eléctrico puede ser tanto positivo como negativo. Consideremos la Figura 10.34.

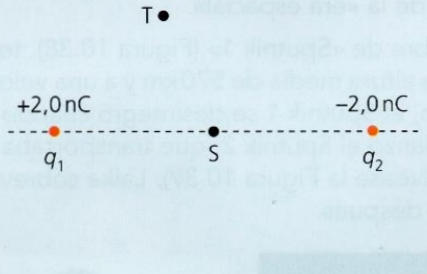


■ **Figura 10.34**
Combinación de campos eléctricos

$V_{combinado} = V_A + V_B$. Por ejemplo, si el potencial en P debido a A es +8V y el potencial en P debido a B es −3V, el potencial total es +5V. Una carga de +1C que se desplazara desde P hasta el infinito *ganaría* 8J si solo estuviera presente A, pero *se necesitarían* 3J para desplazar +1C hasta el infinito si solo estuviera presente B. Si tanto A como B estuvieran presentes, +1C *ganaría* 5J al desplazarse desde P al infinito.

43 Un átomo ionizado simple de masa 23,0 u es acelerado por un voltaje de 4700V en un espectrómetro de masas.
- **a** ¿Cuál es la carga del ion?
- **b** ¿Cuál es su energía cinética máxima (J)?
- **c** ¿Cuál es la velocidad máxima del ion?

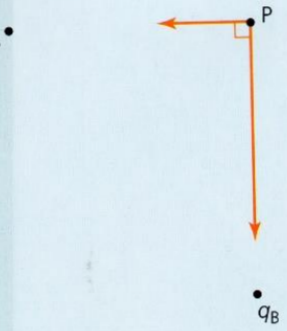
44 ¿Cuáles son los potenciales en los puntos R, S y T representados en la Figura 10.35? (Supón que el dibujo está realizado a tamaño real).



■ **Figura 10.35**

45 Cuatro cargas positivas iguales están situadas en los vértices de un cuadrado de lado 10cm. Si el potencial en el centro del cuadrado es 1000V, ¿cuál es la magnitud de cada una de las cargas?

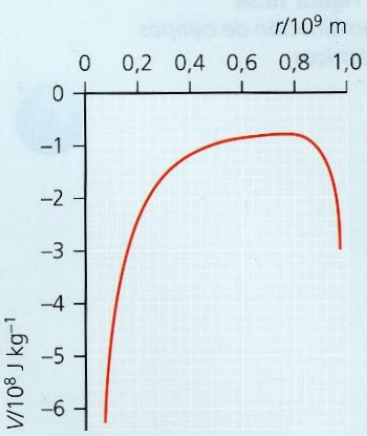
46 Considera la Figura 10.36.
- **a** Si la intensidad del campo eléctrico en P debida a q_A es $4{,}72\,N\,C^{-1}$ y la intensidad del campo eléctrico en P debida a q_B es $14{,}6\,N\,C^{-1}$, determina el módulo de la intensidad del campo combinado, así como su dirección y sentido.
- **b** Si las magnitudes de los dos potenciales individuales en P son 7V y 1V respectivamente, ¿cuál es el potencial combinado?
- **c** ¿Es positivo o negativo?



■ **Figura 10.36**

47 En la Figura 10.37 se representa la variación del potencial gravitatorio, V, entre un planeta y su luna respecto a la separación de sus centros, r.
- **a** Estima el radio del planeta.
- **b** Estima la masa del planeta.
- **c** ¿A qué distancia del centro del planeta es nulo el campo gravitatorio?
- **d** Determina el módulo de la intensidad del campo gravitatorio a $1{,}0 \times 10^8$ m del centro de la luna.

48 **a** Utiliza una hoja de cálculo para calcular el potencial combinado de la Tierra y la Luna en puntos situados a lo largo de la línea que une sus centros (busca los datos necesarios).
- **b** Representa gráficamente tus resultados. ¿Debería tener la curva una forma similar a la de la Figura 10.37?
- **c** ¿Cuánta energía se necesitaría para desplazar una nave espacial de masa 3400 kg desde la superficie de la Tierra hasta la superficie de la Luna?



■ **Figura 10.35**

■ Naves espaciales en campos gravitatorios

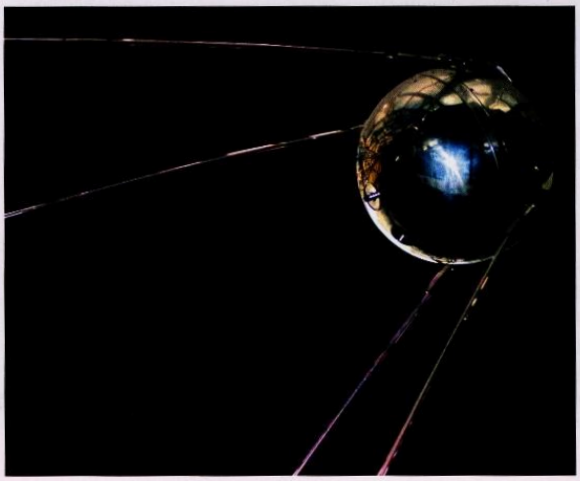
En este apartado consideraremos en primer lugar cuánta energía hay que transferir a una nave espacial para que recorra una larga distancia fuera de la Tierra (o de la Luna, o de otro planeta), y a continuación cuánta energía hay que transferir a un satélite para ponerlo en órbita.

Aplicaciones

Campos gravitatorios: lanzamiento de satélites

Los científicos soñaron durante siglos con la posibilidad de enviar un objeto al espacio exterior de manera que permaneciera en él y no volviera a caer a la Tierra. El primer satélite artificial fue lanzado por la Unión Soviética el 4 de octubre de 1957, y a este acontecimiento histórico se le ha denominado con motivo el inicio de la «era espacial».

El satélite, que recibió el nombre de «Sputnik 1» (Figura 10.38), tenía una masa de 84 kg y orbitaba alrededor de la Tierra a una altura media de 570 km y a una velocidad de 29 000 km h^{-1}. Tres meses después de su lanzamiento, el Sputnik 1 se desintegró cuando volvía a entrar en la atmósfera terrestre. Al poco tiempo se lanzó el Sputnik 2, que transportaba el primer animal al espacio exterior, una perra llamada Laika (véase la Figura 10.39). Laika sobrevivió al lanzamiento, aunque murió en órbita unas pocas horas después.



■ **Figura 10.38**
El Sputnik 1, el primer satélite en el espacio exterior



■ **Figura 10.39**
Laika: el primer animal en el espacio exterior

En pocas palabras, el principal reto fue la transferencia de la energía suficiente al satélite Sputnik para elevarlo por encima de la atmósfera terrestre, y mantenerlo en la dirección y sentido correctos, y a la velocidad adecuada.

1 Calcula la energía potencial gravitatoria del satélite Sputnik sobre la superficie terrestre y en órbita.

2 **a** Calcula la energía potencial gravitatoria que tuvo que ganar el satélite para alcanzar una altura de 570 km.

b Calcula la energía cinética del satélite en órbita y, por tanto, su aumento total de energía en comparación con quedarse inmóvil sobre la superficie terrestre.

3 Averigua qué combustible se utiliza para el lanzamiento de cohetes y los motivos por los que se escoge.

4 Averigua qué países poseen actualmente satélites operativos en órbita.

5 Averigua si existe algún país u organización que controle el uso del espacio que rodea a la Tierra.

Tu respuesta a la pregunta **2b** debe ser del orden de 4×10^{19} J. Sin embargo, la energía transferida debe ser muy superior, porque gran parte de la energía se disipa a causa de la resistencia del aire y por la ineficiencia de los motores. No es posible proyectar directamente un satélite al espacio exterior, por tanto, el lanzamiento debe estar motorizado por cohetes. Uno de los requisitos que debe satisfacer el combustible de un cohete es que se pueda transferir una gran cantidad de energía a partir de una masa relativamente pequeña de combustible. Por ejemplo, si la cantidad de energía teórica máxima que se puede liberar en la combustión de 1 kg de combustible y oxidante es 35 MJ, se necesitan más de 100 kg de combustible y oxidante para obtener los 4×10^{19} J que hay que suministrar. Además, se necesita más energía para lanzar el propio combustible. En estos cálculos no se tiene en cuenta ni la masa del motor ni la de los tanques que contienen el combustible y el oxidante. La masa total del cohete se reduce considerablemente a medida que se quema el combustible y el oxidante y, cuando los tanques se vacían, se pueden desechar.

La «vida útil» habitual de un satélite es de unos 10 años. En la actualidad hay unos 3000 satélites operativos alrededor de la Tierra. La mayoría son rusos y estadounidenses, pero muchos países, incluida China, han lanzado sus propios satélites (Figura 10.40). Desde 1957 se han registrado aproximadamente 25 000 objetos en órbita, la mayoría de los cuales se han desintegrado al volver a entrar en la capa superior de la atmósfera terrestre, pero todavía hay muchos en órbita y se les describe corrientemente como «basura espacial».



Figura 10.40
Lanzamiento de un satélite en China

Velocidad de escape

En teoría, un objeto puede ser *proyectado* (sin motor) hacia arriba de manera que pueda continuar alejándose de la Tierra eternamente. Para que esto sea posible, el objeto tiene que adquirir una velocidad *muy* elevada, y para calcularla necesitamos tener en cuenta las energías. En general, la energía cinética inicial transferida a un objeto se transforma en energía gravitatoria, y también en energía disipada a causa de la resistencia del aire de la atmósfera terrestre.

No obstante, si asumimos que los efectos de la resistencia del aire son despreciables, podemos calcular la velocidad teórica *mínima* que necesita un proyectil de masa m para «escapar» de un planeta de masa M. A esta velocidad se la denomina **velocidad de escape**, v_{esc}, y se puede calcular de la manera siguiente:

energía cinética inicial = cambio en la energía potencial gravitatoria entre la ubicación determinada y el infinito

$$\frac{1}{2}mv_{esc}^2 = 0 - \left(-\frac{GMm}{r}\right)$$

$$V_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*. Observemos que el valor teórico para la velocidad de escape no depende ni de la masa ni de la dirección del movimiento.

Ejemplo resuelto

5 Calcula la velocidad de escape de un proyectil lanzado desde la superficie de la Tierra. (Ignora los efectos debidos a la Luna.)

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2 \times 6{,}67 \times 10^{-11} \times 5{,}97 \times 10^{24}}{6{,}37 \times 10^{6}}}$$

$$v_{esc} = 1{,}12 \times 10^{4}\,\text{m s}^{-1}$$

Esto significa que, *si ignoramos los efectos de la resistencia del aire*, cualquier masa proyectada en cualquier dirección desde la superficie terrestre con una velocidad de $11{,}2\,\text{km s}^{-1}$ nunca volverá a la Tierra. Esta velocidad es suficiente, en teoría, para llevarla al infinito (asumiendo también que no pasa cerca de ninguna otra masa), donde su velocidad se reduciría a cero. Si se lanzara con una velocidad mayor, la masa seguiría moviéndose cuando llegara al infinito.

Indudablemente, no es sensato asumir que no hay resistencia del aire para un objeto que se mueve a una velocidad elevada a través de la atmósfera terrestre, por tanto, este valor calculado es simplemente un mínimo teórico. Sin embargo, estos cálculos sí son válidos sobre un planeta o una luna que no tenga atmósfera, o bien si el punto de partida del lanzamiento se encuentra ya por encima de la atmósfera terrestre. En estos cálculos también se ignoran los posibles efectos de otros campos gravitatorios generados por otros planetas, lunas y estrellas.

Podemos proporcionar a un objeto una velocidad inicial de $11{,}2\,\text{km s}^{-1}$, pero no es posible proyectar un objeto con la suficiente velocidad y energía cinética para vencer todas las fuerzas resistivas de la atmósfera. Las naves espaciales que se ponen en órbita alrededor de la Tierra *no son* proyectiles, sino que son transportadas lejos de la superficie terrestre mediante las fuerzas continuas procedentes de motores de cohete que actúan durante periodos largos de tiempo.

49 **a** Calcula la velocidad de escape de la superficie de la Luna (masa = $7{,}4 \times 10^{22}$ kg y radio = $1{,}7 \times 10^{6}$ m).
b Explica por qué la velocidad de escape real es algo superior a la de tu respuesta.
c Explica por qué un vehículo espacial lanzado desde la Luna podría alcanzar la Tierra si se le proporcionara una velocidad inicial inferior.

50 Calcula la velocidad de escape desde una órbita situada a 350 km sobre la superficie terrestre.

51 ¿A qué distancia de la Tierra se reduce la velocidad de escape a un 1% de su valor sobre la superficie terrestre?

52 **a** La masa del Sol es $2{,}0 \times 10^{30}$ kg. Calcula hasta qué valor se tendría que reducir su radio para que la velocidad de escape desde su «superficie» fuera igual a la velocidad de la luz ($3 \times 10^{8}\,\text{m s}^{-1}$), de manera que se convirtiera en un *agujero negro*.
b Compara tu respuesta con el valor real del radio del Sol.

53 Considera el efecto combinado de los campos gravitatorios de la Tierra y de la Luna sobre la superficie terrestre.
a ¿En cuánto supera la velocidad de escape de la Tierra al valor $1{,}12 \times 10^4\ m\,s^{-1}$?
b ¿Se puede ignorar el efecto de la Luna?

54 Calcula la velocidad de escape de un planeta de radio $2{,}2 \times 10^3$ km si la intensidad del campo gravitatorio sobre su superficie es $3{,}9\ N\,kg^{-1}$.

Perspectivas adicionales

Atmósferas

Si tenemos un gas en el interior de un contenedor sobre la superficie terrestre, normalmente asumimos que sus moléculas se distribuyen aleatoriamente y que se mueven a una velocidad media representada por la temperatura absoluta (Capítulo 3). Por ejemplo, a 300 K la velocidad media de las moléculas de nitrógeno es de unos $500\ m\,s^{-1}$. Sin embargo, si el contenedor fuera muy grande, deberíamos también tener en cuenta los efectos de la gravedad, que actúa sobre las moléculas de un gas del mismo modo que sobre cualquier otra masa.

La velocidad de las moléculas disminuye a medida que ascienden y, a causa de la distribución de velocidades moleculares de todos los gases, a mayor altura habrá menos moléculas por unidad de volumen. La consecuencia es una disminución de las propiedades macroscópicas del gas: presión, densidad y temperatura. Recordemos que las moléculas colisionan continuamente entre sí, lo que da lugar a cambios aleatorios en las energías cinéticas y las velocidades individuales.

La atmósfera terrestre no es un sistema aislado y, aunque los principios descritos anteriormente son válidos, la situación real es mucho más compleja, porque existe una transferencia continua de energía (procedente del Sol y de la Tierra) a la atmósfera. La energía transferida al aire procede principalmente de la superficie terrestre, por tanto, cabe esperar que el aire cercano a la superficie esté más caliente y que en la cima de una montaña esté más frío. Estos cambios de temperatura provocan a su vez cambios en la presión y la densidad del aire, que desencadenan corrientes de convección a nivel local y a nivel planetario.

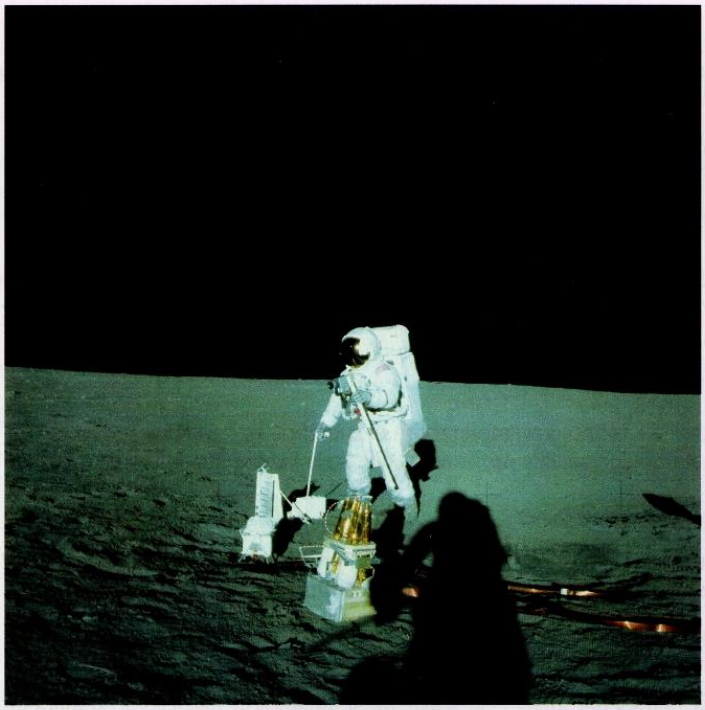


Figura 10.41
La Luna no tiene atmósfera significativa, por tanto, el cielo es de color negro

Un porcentaje muy pequeño de las moléculas que alcanzan las capas altas de la atmósfera pueden adquirir una velocidad superior a la de escape, de modo que pueden abandonar la atmósfera de modo permanente. Sin embargo, los procesos geológicos y biológicos que crearon la atmósfera terrestre siguen en marcha y los gases se reponen.

La masa de la Luna es mucho menor que la de la Tierra, por tanto, su velocidad de escape es también mucho menor. Esto significa que, a lo largo del tiempo, casi todas las moléculas de gas que estaban presentes en el pasado han escapado, sin que haya procesos en marcha que permitan reemplazarlas. Como consecuencia, la Luna no posee una atmósfera significativa y, por tanto, el cielo visto desde la Luna es de color negro, ya que no hay moléculas de gas que dispersen la luz (Figura 10.41).

1 **a** Demuestra que las moléculas que ascienden verticalmente a $500\ m\,s^{-1}$ alcanzarían una altura de unos 12 km si no colisionaran con otras moléculas.

b Explica por qué se pueden encontrar muchas moléculas de aire a alturas muy superiores a la del apartado anterior.

2 Averigua de dónde procede la atmósfera terrestre y si podría haber atmósfera en la Luna si esta tuviera un tamaño mayor.

3 ¿Hay atmósfera en Mercurio, Venus y Marte? ¿Hay atmósfera en algún otro planeta o luna del sistema solar?

Movimiento orbital, velocidad orbital y energía orbital

Velocidad de un satélite en órbita

En el Capítulo 6 vimos que un satélite que describe una órbita circular alrededor de un planeta debe tener la velocidad orbital, $v_{orbital}$, adecuada para una altura dada. Esta velocidad se puede calcular igualando la aceleración centrípeta a la aceleración gravitatoria:

$$\frac{v_{orbital}^2}{r} = g = \frac{GM}{r^2}$$

por tanto

$$v_{orbital} = \sqrt{gr}$$

y

$$v_{orbital} = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física.*

Porque:

$$v_{orbital} = \frac{2\pi r}{T}$$

$$\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2 = \frac{GM}{r}$$

Reagrupando términos obtenemos una ecuación que conecta directamente el radio con el periodo:

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$$

(Esta útil ecuación es una forma de expresar la tercera ley de Kepler, pero *no* se requiere su conocimiento en el curso de física IB).

Supón que todas las órbitas son circulares.

55 El radio de la Luna es 1740 km y la intensidad del campo gravitatorio sobre su superficie es $1{,}61\,N\,kg^{-1}$.
- **a** ¿Cuál es la velocidad orbital necesaria para que un satélite orbite alrededor de la Luna a una altura de 1740 km sobre su superficie?
- **b** ¿Cuántas horas tarda este satélite en completar una órbita?

56 La masa de Júpiter es $1{,}90 \times 10^{27}$ kg. Ganímedes es una de sus lunas (satélites naturales) y su centro se encuentra a una distancia de $1{,}07 \times 10^6$ km del centro de Júpiter. ¿Cuál es el periodo de su órbita en días?

57 Si un satélite que orbita alrededor de la Tierra necesita llevar una velocidad de $5\,km\,s^{-1}$ exactamente, ¿a qué altura sobre la superficie terrestre se encuentra? (masa de la Tierra = $5{,}97 \times 10^{24}$ kg; radio de la Tierra = $6{,}37 \times 10^6$ m)

58 **a** La distancia media entre los centros de la Tierra y del Sol es $1{,}50 \times 10^{11}$ m. Si tratamos la Tierra como si fuera un satélite del Sol, estima su periodo en segundos. (masa del Sol = $1{,}99 \times 10^{30}$ kg)
- **b** Sugiere un motivo por el que la respuesta no es exactamente 1 año.

59 Utiliza una hoja de cálculo para calcular velocidades orbitales de satélites que orbitan la Tierra a diferentes alturas (hasta 40 000 km). Representa gráficamente los resultados que has obtenido.

Energía de un satélite en órbita

Sabemos que cuando lanzamos una pelota hacia arriba a través del aire, gana energía gravitatoria y pierde energía cinética a medida que se aleja de la Tierra. El proceso sucede a la inversa cuando se acerca a la Tierra. Si no hubiera resistencia del aire, la energía total de la pelota se mantendría constante. El mismo principio se aplica a satélites naturales o artificiales, planetas y cometas en sus órbitas.

Para determinar la energía total, E_T, de un satélite, sumamos su energía cinética, E_C, a su energía potencial gravitatoria, E_P:

$$E_T = E_C + E_P$$

Recordemos que tanto la energía total como la energía potencial gravitatoria deben ser negativas, porque un satélite en órbita no tiene la suficiente energía para escapar del campo gravitatorio terrestre. Para un satélite de masa m que orbita alrededor de un planeta de masa M con una velocidad v y a una distancia r de su centro, sabemos que:

$$E_P = -\frac{GMm}{r}$$

Por tanto:

$$E_T = \frac{1}{2}mv^2 + \left(-\frac{GMm}{r}\right)$$

También sabemos que:

$$v^2 = \frac{GM}{r}$$

Entonces:

$$E_C = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\frac{GM}{r}$$

Y se obtiene:

$$E_C = \frac{1}{2}\frac{GMm}{r}$$

Lo que nos lleva a:

$$E_T = \frac{1}{2}\frac{GMm}{r} + \left(-\frac{GMm}{r}\right)$$

$$E_T = -\frac{1}{2}\frac{GMm}{r}$$

Estas ecuaciones *no* figuran en el *Apéndice de datos de Física*.

Estas ecuaciones nos indican que la energía total de un satélite en una órbita estable es siempre igual en módulo a su energía cinética, que es positiva, mientras que la energía total es negativa. La energía total es igual a la mitad de la energía potencial gravitatoria, tal como se muestra gráficamente en la Figura 10.42.

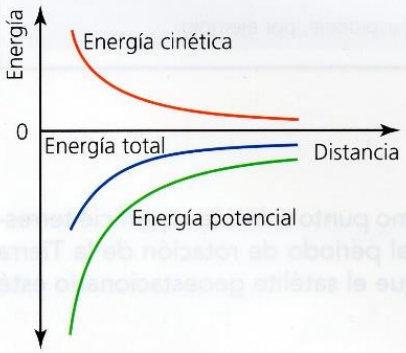


Figura 10.42
Energías de un satélite

Para poder «escapar» de su órbita (no del suelo), un satélite necesita tener una energía cinética igual a su energía potencial gravitatoria a esa altura (o superior). Ya tiene la energía cinética necesaria para su movimiento orbital, de modo que necesitaría ganar una cantidad equivalente de energía cinética, es decir, necesita doblar su energía cinética para poder escapar del planeta.

Si un satélite que se mueve en una órbita circular (a una altura relativamente baja) experimenta algún tipo de resistencia del aire, su velocidad a esa altura disminuye y, por tanto, la fuerza gravitatoria que actúa sobre el satélite es mayor que la fuerza centrípeta necesaria para esa altura y velocidad. Si el satélite no tiene modo de controlar su movimiento, se producirá un cambio en la altura, de manera que se moverá en una órbita más cercana a la Tierra, y, por tanto, ganará velocidad y energía cinética. La energía total y la energía potencial gravitatoria disminuirán a medida que se disipa energía en forma de energía térmica. Cuando el satélite se mueve en una órbita más cercana a la Tierra, la resistencia del aire aumenta y su trayectoria descendente se hace más escarpada, lo que da lugar a una velocidad mayor y a una disipación de energía también mayor. Como la resistencia del aire es muy pequeña a grandes alturas, este proceso puede tener una larga duración, pero los satélites en órbitas a baja altura han llegado ocasionalmente a estrellarse contra la Tierra, aunque la mayoría se «desintegran» en la atmósfera.

60 **a** ¿Qué le sucede a la energía total de un satélite si encuentra resistencia del aire?
b Utiliza la ecuación para la energía total de un satélite para explicar qué le sucederá a un satélite que está perdiendo energía.
c Explica por qué aumentará la velocidad del satélite y por qué aumentan estos efectos a medida que el satélite desciende a órbitas más bajas.

61 **a** Explica lo que crees que significa el término «desintegrarse» en el párrafo anterior.
b Averigua cuándo se estrelló realmente un satélite sobre la superficie terrestre y qué ocurrió.

62 Un satélite de masa 820 kg orbita a una altura de 320 km sobre la superficie terrestre. Calcula:
a su energía potencial gravitatoria
b su energía cinética
c su energía total (radio de la Tierra = $6{,}4 \times 10^6$ m, masa de la Tierra = $6{,}0 \times 10^{24}$ kg)
d la velocidad que tendría que llevar para escapar de la Tierra.

Dos tipos distintos de órbitas

Los satélites se pueden poner en órbita a la altura que queramos sobre la superficie terrestre, suponiendo que sea suficiente como para evitar la resistencia del aire (por encima de 200 km aproximadamente). Las órbitas más cercanas a la Tierra presentan ventajas evidentes, especialmente si se está monitorizando la superficie terrestre por algún motivo. Sin embargo, el otro factor importante (y relacionado), además de la altura, es el periodo. La orientación de la órbita en relación al eje de rotación de la Tierra y el hecho de que sea circular o elíptica son también factores cruciales.

Órbitas polares

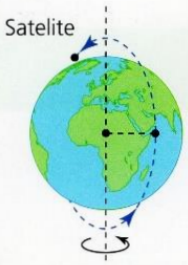


Figura 10.43
Satélite de órbita polar

Muchos satélites tienen órbitas que pasan aproximadamente por encima de ambos polos terrestres a alturas de hasta 2000 km aproximadamente (Figura 10.43). Mientras la órbita permanece en el mismo plano, la Tierra rota, de manera que el satélite pasa sobre distintas zonas del planeta en cada órbita. Estos satélites realizan varias órbitas diarias.

Ejemplo resuelto

6 **a** ¿Cuántas órbitas diarias alrededor de la Tierra efectúa un satélite de órbita polar situado a 400 km de altura?
b Sugiere un posible uso de este satélite.

a radio de la órbita = radio de la Tierra ($6{,}37 \times 10^3$ km) + 400 = $6{,}77 \times 10^3$ km

$$v_{orbital} = \sqrt{\frac{GM}{r}} = \sqrt{\frac{(6{,}67 \times 10^{-11}) \times (5{,}97 \times 10^{24})}{6{,}77 \times 10^6}}$$

$$v_{orbital} = 7670\,\text{m s}^{-1}$$

$$\text{periodo, } T = \frac{2\pi r}{v_{orbital}} = \frac{2 \times \pi \times 6{,}77 \times 10^6}{7670} = 5546\,\text{s, o } 1{,}54\,\text{h}$$

$$\text{número de órbitas en un día} = \frac{24}{1{,}54} = 15{,}6$$

b Existen muchos: elaboración de mapas, monitorización meteorológica y espionaje, por ejemplo.

Órbitas geoestacionarias

Un satélite geoestacionario permanece siempre sobre el mismo punto sobre la superficie terrestre, algo que solo es posible si el periodo del satélite es igual al periodo de rotación de la Tierra (23 h 56 min). Como hemos visto anteriormente, esto requiere que el satélite geoestacionario esté exactamente a la altura adecuada.

$$v_{orbital} = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

y

$$T = \frac{2\pi r}{v_{orbital}} \text{ (o tercera ley de Kepler)}$$

se puede demostrar que el radio orbital requerido es $4{,}2 \times 10^7$ m.

Cualquier satélite situado a esta altura tendrá el mismo periodo que el de rotación de la Tierra, es decir, será *geosincrónico*. No obstante, los satélites *geoestacionarios* deben orbitar en el mismo plano que el ecuador. Las dos órbitas que se representan en la Figura 10.44 son geosincrónicas, pero solo la órbita de **a** es geoestacionaria.

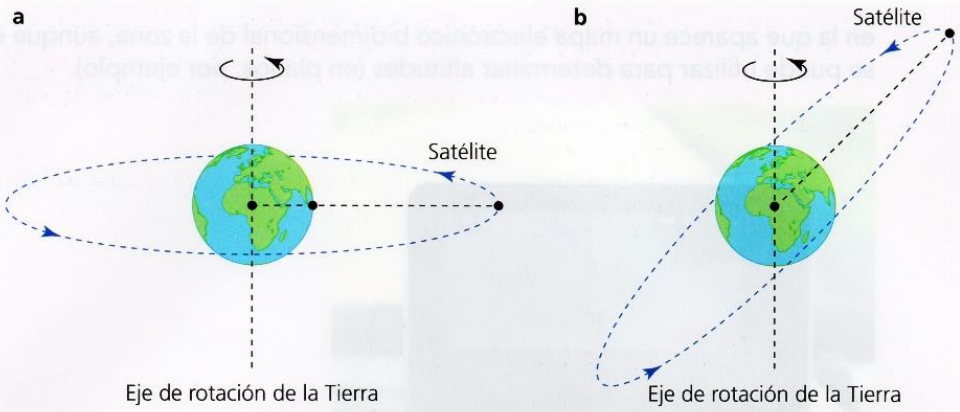


Figura 10.44
Las órbitas geoestacionarias deben estar en el plano del ecuador

Los satélites geoestacionarios son especialmente útiles porque las antenas de transmisión y recepción terrestres pueden mantener la misma orientación, apuntando hacia el mismo lugar del cielo sin necesidad de «seguir» el satélite. Este hecho es muy útil para las comunicaciones, emisiones de televisión, etc.

63 Determina la altura a la que debe estar una órbita geoestacionaria sobre la superficie terrestre en kilómetros y con tres cifras significativas.

64 La Luna rota una vez sobre su eje cada 27,3 días.
- **a** Explica por qué vemos siempre la misma cara de la Luna desde la Tierra.
- **b** ¿Cuál sería el radio de una órbita estacionaria lunar? (masa de la Luna = $7{,}35 \times 10^{22}$ kg)

65 Explica por qué el periodo de rotación terrestre no es exactamente de 24 h.

66 Los satélites geoestacionarios orbitan lejos de la superficie terrestre.
- **a** ¿Significa esto que hay un retraso significativo cuando nos comunicamos con ellos?
- **b** Argumenta si para estos satélites las antenas tienen que ser significativamente mayores que para los satélites que orbitan más cerca de la Tierra.

67 Haz una lista de los distintos usos de los satélites.

Aplicaciones

Órbitas: sistemas de posicionamiento global (GPS, por sus siglas en inglés)

Para el funcionamiento del sistema GPS se necesitan cerca de 30 satélites orbitando alrededor de la Tierra a una altura aproximada de 20 000 km. El sistema más utilizado está a cargo del gobierno estadounidense, pero está disponible gratuitamente para todo el mundo. Rusia tiene su propio sistema y China también está desarrollando el suyo. Cada satélite GPS estadounidense transmite de forma continua mensajes de microondas de frecuencia 1,6 GHz (longitud de onda 19 cm), cada uno en su momento exacto. Cada satélite describe una órbita alrededor de la Tierra unas dos veces al día.

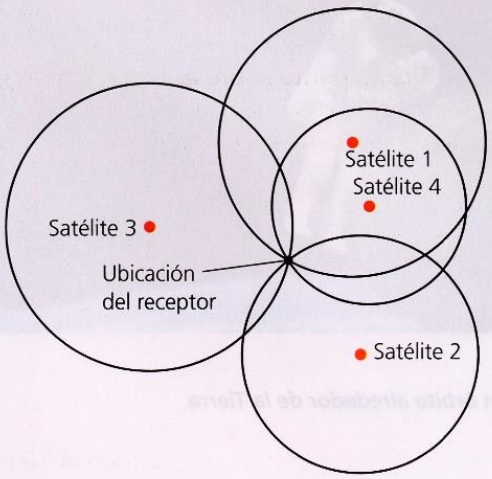


Figura 10.45
Intersección de esferas alrededor de satélites GPS

Cuando un receptor GPS detecta una señal, compara el momento en que es recibida con el momento en que fue transmitida, y a continuación calcula el tiempo de retraso (tiempo de tránsito) y la distancia al satélite (utilizando la velocidad de las ondas electromagnéticas). El receptor, evidentemente, debe contar con un reloj muy preciso. Si se efectúan cálculos similares a partir de las señales procedentes de otros dos satélites (o más), se puede determinar la ubicación del receptor. En la Figura 10.45 podemos ver una representación bidimensional de la intersección tridimensional de cuatro esferas. Todos los satélites se encuentran a alturas similares sobre la superficie terrestre, pero su distancia respecto a un receptor dado varía constantemente.

Con los mejores equipos (militares) se puede localizar un receptor en términos de latitud, longitud y altitud con una precisión de unos pocos centímetros. Sin embargo, las legislaciones internacionales limitan la precisión de los receptores civiles a unos cuantos metros.

Si un receptor móvil recalcula su posición tras un breve intervalo de tiempo conocido, puede calcular su velocidad y la dirección y sentido del movimiento. Toda esta información se visualiza habitualmente sobre una pantalla

en la que aparece un mapa electrónico bidimensional de la zona, aunque el sistema GPS también se puede utilizar para determinar altitudes (en planos, por ejemplo).



Figura 10.46
Un sistema GPS en un coche

La Unión Europea está desarrollando su propio sistema GPS, que se denomina Galileo, y que estará operativo en los próximos años. La idea es que el sistema Galileo sea únicamente de uso civil y que Europa tenga su propio sistema independiente.

1 Sugiere por qué es mejor utilizar las señales procedentes de cuatro o más satélites en lugar de utilizar solo las de tres.

2 Si el sistema tiene una precisión máxima de 5 cm, ¿qué nivel de precisión requiere aproximadamente el reloj del receptor?

3 ¿Por qué crees que los gobiernos pueden desear limitar la precisión de los sistemas GPS accesibles al público en general?

4 ¿Por qué es importante que las señales viajen desde el satélite al receptor en una línea recta?

Ingravidez

Dado que el peso es la fuerza sobre una masa, para tener una total ingravidez hay que estar en un lugar donde no haya campo gravitatorio significativo, como en el espacio profundo, muy lejos de los efectos gravitatorios de cualquier estrella o planeta.

De forma alternativa, una masa podría parecer ingrávida si estuviera en un punto donde las fuerzas gravitatorias debidas a dos o más campos se cancelaran entre sí; por ejemplo, en un punto situado entre la Tierra y la Luna.

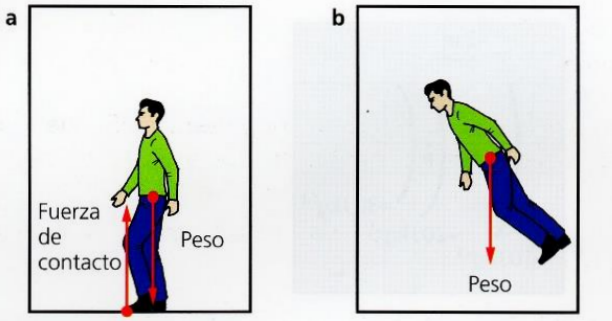
A todos nos resultan familiares los vídeos de astronautas que se mueven libremente en el interior o en el exterior de satélites que orbitan la Tierra (Figura 10.47). Se suele decir que están «ingrávidos» pero no es exactamente así, porque la intensidad del campo gravitatorio a la altura a la que orbita un satélite no es mucho menor que la intensidad sobre la superficie terrestre. Necesitamos comprender cómo y por qué un objeto parece ingrávido cuando está sometido a un campo gravitatorio.



Figura 10.47
«Ingravidez» en órbita alrededor de la Tierra

No podemos sentir o notar nuestro propio peso directamente, pero somos conscientes de él gracias a la fuerza de contacto procedente de la superficie que hay debajo de nosotros, y que nos empuja hacia arriba. Si eliminamos esta fuerza de contacto nos sentimos ingrávidos, aunque normalmente nos preocupa más el hecho de que estamos en caída libre. En el interior de un ascensor, de una atracción de feria o de un vehículo que circula por una carretera con baches, la fuerza de contacto entre la superficie que nos soporta y nosotros varía durante los cambios verticales de velocidad. Como resultado, podemos tener la sensación de que nuestro peso aumenta o disminuye; e incluso nos podemos sentir brevemente «ingrávidos», si durante un corto periodo de tiempo no hay apenas contacto entre la superficie y nosotros, o incluso no hay contacto en absoluto.

A todos los efectos, un satélite se está acelerando hacia el centro de la Tierra (mientras se mueve lateralmente al mismo tiempo). Los astronautas que están en su interior se aceleran exactamente de la misma forma que el satélite y no hay necesidad de contacto entre ellos y el satélite, de modo que se sienten «ingrávidos» (Figura 10.48).



Velocidad constante, aceleración cero (incluyendo movimiento estacionario)

No hay fuerza resultante sobre la persona

Aceleración, persona y cabina en caída libre

Fuerza resultante hacia abajo

Figura 10.48 *Pérdida de contacto con el suelo*

En el entrenamiento de astronautas se incluye la simulación de la ingravidez a bordo de aviones que siguen la trayectoria parabólica que describiría un proyectil moviéndose libremente (sin resistencia del aire).

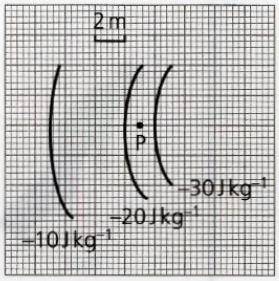
Selección de preguntas de examen

Hoja 1 Preguntas del IB y preguntas tipo IB

1 Un satélite se encuentra en una órbita circular alrededor de la Tierra. Cuando se desplaza a una órbita más cercana a la superficie terrestre, ¿cuál de las opciones siguientes describe los cambios energéticos que tienen lugar?

A. La energía potencial gravitatoria aumenta, la energía cinética aumenta.
B. La energía potencial gravitatoria aumenta, la energía cinética disminuye.
C. La energía potencial gravitatoria disminuye, la energía cinética aumenta.
D. La energía potencial gravitatoria disminuye, la energía cinética disminuye.

2 En este diagrama se representan las líneas equipotenciales de un campo gravitatorio.



¿Cuál de las opciones siguientes describe la dirección, sentido e intensidad del campo en el punto P?

	Dirección y sentido	Intensidad
A	←	5,0 $N kg^{-1}$
B	→	5,0 $N kg^{-1}$
C	←	13 $N kg^{-1}$
D	→	13 $N kg^{-1}$

© IB Organization

3 ¿Cuál de las opciones siguientes es una descripción correcta de la intensidad del campo eléctrico y del potencial eléctrico alrededor de una única carga puntual?

A. La intensidad del campo es una magnitud vectorial; el potencial es una magnitud vectorial.
B. La intensidad del campo es una magnitud vectorial; el potencial es una magnitud escalar.
C. La intensidad del campo es una magnitud escalar; el potencial es una magnitud vectorial.
D. La intensidad del campo es una magnitud escalar; el potencial es una magnitud escalar.

4 ¿Cuál de las opciones siguientes corresponde a la expresión correcta de la energía cinética mínima que necesita una masa m para escapar de la atracción gravitatoria de un planeta de masa M y radio R?

A. $\frac{GM}{r}$

B. $\frac{GM}{2R}$

C. $\frac{GMm}{R}$

D. $\frac{GM}{R^2}$

5 Cuatro cargas están situadas en los cuatro vértices de un cuadrado, tal como se muestra en el diagrama.



¿En qué posición el valor del potencial eléctrico total es cero?

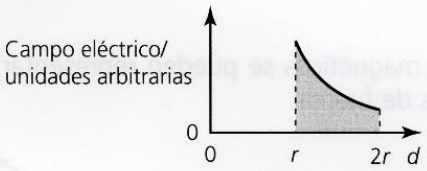
A. en ninguna
B. en el centro del cuadrado
C. en el punto medio entre dos cargas negativas
D. en el punto medio entre dos cargas positivas.

6 El potencial gravitatorio sobre la superficie de un planeta es V. ¿Cuál es el potencial sobre la superficie de otro planeta con la misma densidad media pero cuyo radio es la mitad del radio del primero?

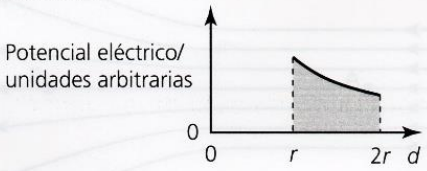
A. $\frac{V}{4}$
B. $\frac{V}{2}$
C. $2V$
D. $4V$

7 Las dos gráficas que se muestran abajo representan la variación del potencial eléctrico alrededor de una carga puntual aislada respecto a la distancia d, desde $d = r$ hasta $d = 2r$.

Gráfica 1:



Gráfica 2:



El trabajo realizado por una fuerza externa para desplazar una carga de prueba $+q$ desde $d = 2r$ hasta $d = r$ es igual a q multiplicada por:

A. el área sombreada bajo la curva de la gráfica 1
B. el área sombreada bajo la curva de la gráfica 2
C. el valor medio del campo eléctrico
D. el valor medio del potencial eléctrico.

© IB Organization

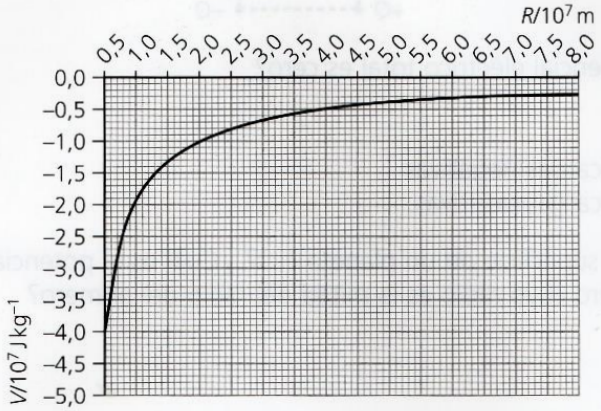
1 Dos satélites, P y Q, han sido colocados en sendas órbitas circulares alrededor de la Tierra. El periodo del satélite P es 2 horas y el periodo del satélite Q es 16 horas. ¿Cuál de las opciones siguientes representa correctamente el cociente entre el radio de la órbita del satélite Q y el radio de la órbita del satélite P?

A. 64
B. 16
C. 4
D. 2

Hoja 2 Preguntas del IB y preguntas tipo IB

1 a Define el potencial gravitatorio en un punto de un campo gravitatorio. (3)

b En la gráfica inferior se representa la variación del potencial gravitatorio V respecto a la distancia R desde el centro de un planeta. El radio R_0 del planeta = $5{,}0 \times 10^6$ m. Los valores de V para $R < R_0$ no están representados.

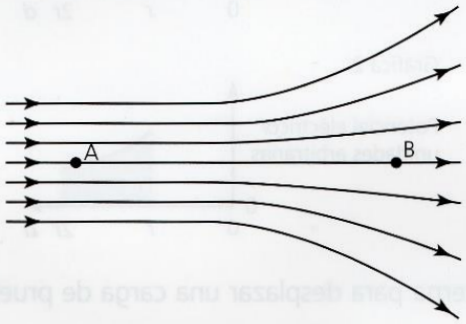


Utiliza la gráfica para determinar el módulo de la intensidad del campo gravitatorio en la superficie del planeta. (3)

c Se lanza un satélite de $3{,}2 \times 10^3$ kg desde la superficie del planeta. Utiliza la gráfica para determinar la velocidad de lanzamiento mínima que debe tener el satélite para alcanzar una altura de $2{,}0 \times 10^7$ m sobre la superficie del planeta. (Puedes suponer que alcanza su velocidad máxima inmediatamente después del lanzamiento.) (4)

© IB Organization

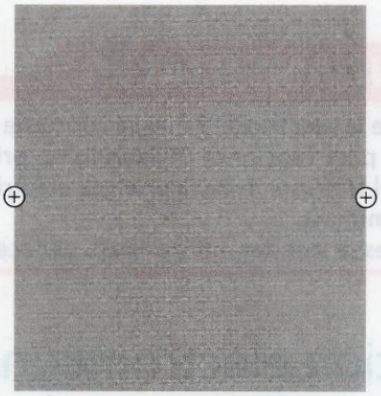
2 a Los campos eléctricos y los campos magnéticos se pueden representar mediante líneas de fuerza. En el diagrama inferior se representan algunas líneas de fuerza.



i. Indica si la intensidad del campo en A y en B es constante, creciente o decreciente cuando se mide en el sentido desde A hacia B. (2)

ii. Explica por qué las líneas de campo nunca se pueden tocar o cruzar. (2)

b En el diagrama inferior se representan dos esferas metálicas aisladas. Cada esfera tiene la misma carga positiva.



Copia el diagrama y dibuja sobre él, en el área sombreada, el esquema del campo eléctrico debido a las dos esferas. (3)

© *IB Organization*

3 a Explica por qué a los potenciales gravitatorios (y a las energías potenciales) siempre se les otorgan valores negativos. (2)

b El potencial eléctrico en un punto situado a 1,0 m de la superficie de una esfera hueca cargada de radio 10 cm es +250 V. Determina la carga sobre la esfera. (2)

c ¿Cuál es el potencial sobre la superficie de la esfera? (1)

d ¿Cuál es el potencial en el centro de la esfera? (1)

11 Inducción electromagnética

IDEAS FUNDAMENTALES

- La mayor parte de la electricidad que se consume en el planeta es generada por máquinas que fueron diseñadas para funcionar utilizando los principios de la inducción electromagnética.
- La generación y el transporte de la energía eléctrica en forma de corriente alterna (CA) ha transformado el mundo.
- Los condensadores se pueden utilizar para almacenar energía eléctrica para su uso posterior.

11.1 Inducción electromagnética

La mayor parte de la electricidad que se consume en el planeta es generada por máquinas que fueron diseñadas para funcionar utilizando los principios de la inducción electromagnética

Fuerza electromotriz (fem)

El concepto de fuerza electromotriz (fem) se introdujo en el Capítulo 5 en relación a las pilas y baterías. En este capítulo explicaremos el origen de las fem suministradas a los circuitos mediante generadores eléctricos.

Inducción de una fem mediante el movimiento

Siempre que un conductor se desplaza a través de un campo magnético (o bien un campo magnético se desplaza a través de un conductor), se *induce* una fem, y a este efecto se le denomina **inducción electromagnética**. (El término *inducción* significa en este contexto «acto de hacer que algo ocurra»). Aunque estos dos efectos son esencialmente el mismo, empezaremos describiéndolos por separado.

Inducción electromagnética mediante el desplazamiento de un conductor a través de un campo magnético

En la Figura 11.1 se representa un experimento simple en el que se induce una fem cuando un conductor (un cable metálico) se desplaza *a través* de un campo magnético. La fem inducida se detecta porque genera una pequeña corriente que circula a través de un circuito que contiene un amperímetro sensible, denominado **galvanómetro**.

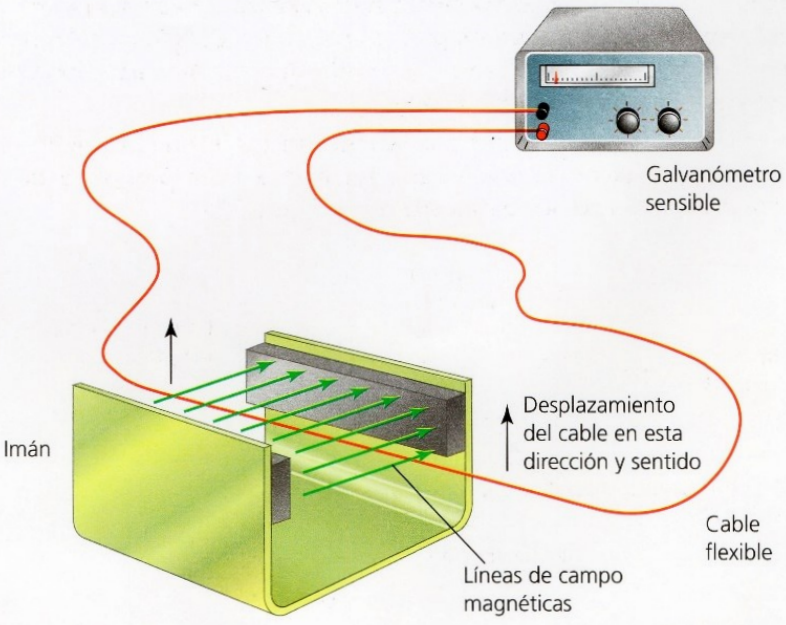


Figura 11.1 *Inducción de una fem mediante el desplazamiento de un cable a través de un campo magnético*

Las partículas cargadas del conductor experimentan fuerzas (tal como se explicó en el Capítulo 5) porque se desplazan con el cable a medida que este atraviesa el campo magnético. Como es un conductor, contiene *electrones libres* que se pueden desplazar por el cable bajo la acción de estas fuerzas. Otras cargas (protones y la mayoría de los electrones) también experimentan fuerzas

pero no se pueden desplazar por el conductor. El desplazamiento del cable, que contiene electrones libres, equivale a una corriente de carga *positiva* en sentido contrario. Podemos utilizar la regla de la mano izquierda para predecir las fuerzas sobre los electrones, como se muestra en la Figura 11.2. En este caso la fuerza magnética empuja a los electrones hacia la izquierda, de manera que el extremo izquierdo del conductor se carga negativamente, mientras que el otro extremo se carga positivamente (porque faltan electrones). Esta separación de cargas genera una diferencia de potencial (fem) entre los extremos del conductor.

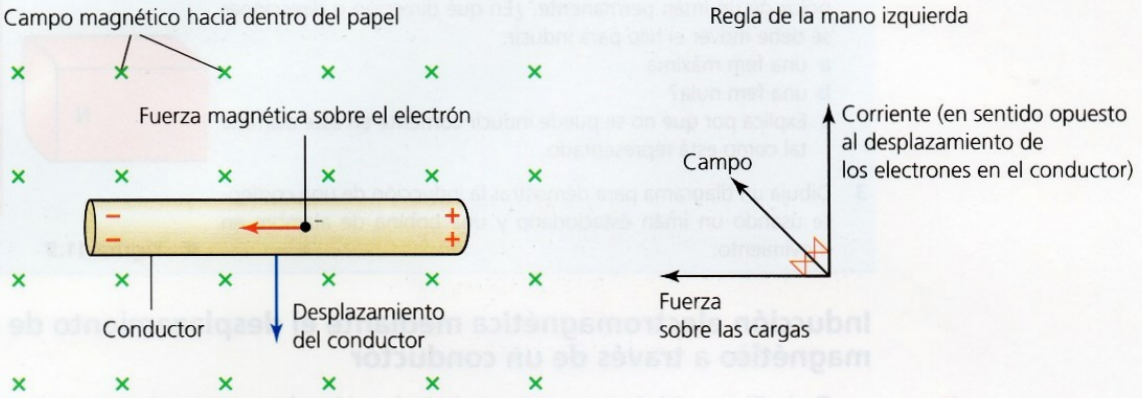
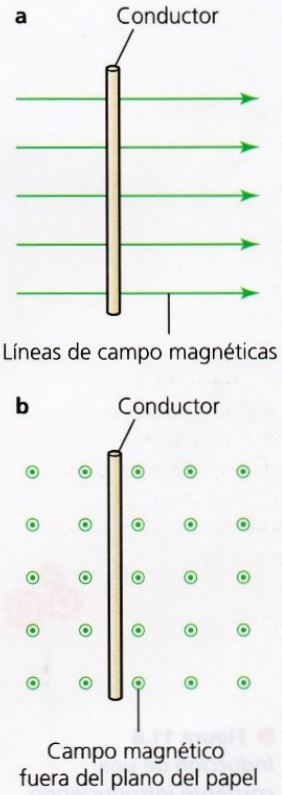


Figura 11.2 *La fuerza magnética sobre los electrones produce una separación de carga*

Si el desplazamiento *o* el campo magnético cambian de sentido, la fem también lo hace. (Si *ambos* cambian de sentido, la fem permanece invariable). Si tanto el conductor como el campo magnético se mueven con la misma velocidad, no se genera ninguna fem. Para que se produzca inducción electromagnética debe haber un *desplazamiento relativo* entre el conductor y el campo magnético. Este efecto es importante y se debe comprender bien porque tiene muchas aplicaciones. Además, es el principio fundamental que sustenta la generación de la energía eléctrica mundial.

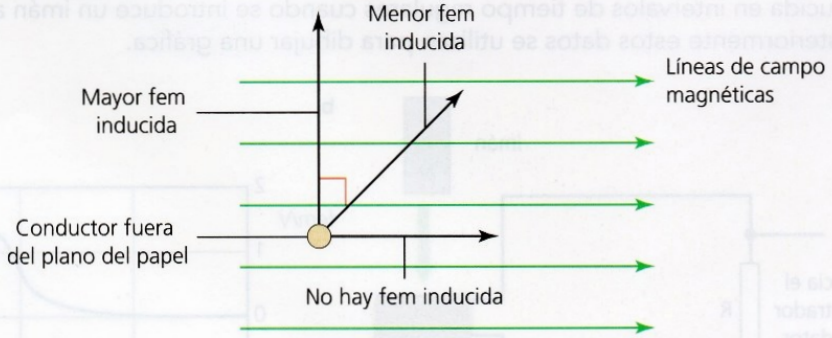
Para que un conductor pueda inducir una fem es necesario que se mueva *a través* de un campo magnético. Los campos magnéticos están representados por *líneas de campo* y el conductor debe moverse de modo que las «intersecte» o atraviese. Si el conductor se desplaza en una dirección paralela a las líneas de campo magnéticas, no habrá fem inducida. Consideremos los ejemplos representados en la Figura 11.3. Para inducir una fem en **a**, el conductor se debe mover de modo que su desplazamiento tenga una componente hacia dentro o hacia fuera del plano del papel. En **b** el campo magnético está fuera del plano del papel, y el conductor se debe mover de modo que su desplazamiento tenga una componente paralela al papel.

Figura 11.3 *Dirección y sentido del desplazamiento que produce una inducción electromagnética*



Para dos conductores similares que se mueven a la misma velocidad, la fem inducida es mayor cuando el desplazamiento es perpendicular al campo magnético, tal como se muestra en la Figura 11.4.

Figura 11.4 *El módulo de una fem inducida depende de la dirección y el sentido del desplazamiento*



La fem inducida de la Figura 11.1 es muy pequeña, pero existen varios métodos simples para aumentar su módulo de forma significativa:

- un desplazamiento más rápido
- el uso de un imán con una mayor intensidad del campo magnético (más potente)

- enrollar un hilo conductor largo en una bobina con muchas vueltas (espiras) (y mover *un único* lado de la bobina a través del campo)
- utilizar campos magnéticos y bobinas con superficies mayores.

1 Explica por qué no se induce una fem a través de una cuerda de plástico cuando esta se desplaza a través de un campo magnético.

2 En la Figura 11.5 se representa un alambre de cobre entre los polos de un imán permanente. ¿En qué dirección o direcciones se debe mover el hilo para inducir:
   a una fem máxima
   b una fem nula?
   c Explica por qué no se puede inducir corriente en este alambre tal como está representado.

3 Dibuja un diagrama para demostrar la inducción de una corriente usando un imán estacionario y una bobina de alambre en movimiento.

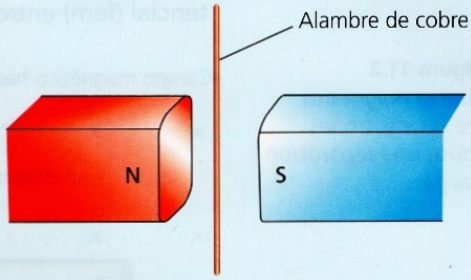


Figura 11.5

Inducción electromagnética mediante el desplazamiento de un campo magnético a través de un conductor

En la Figura 11.6 se representa la inducción electromagnética producida por el desplazamiento de un campo magnético (alrededor de un imán permanente) a través de un conductor. De nuevo, en este ejemplo elemental, la fem y la corriente inducidas son muy pequeñas, pero en la Figura 11.7 se muestra cómo se pueden aumentar significativamente los efectos enrollando el hilo conductor en una bobina o *solenoide* con muchas vueltas (espiras). El sentido de la corriente inducida se invierte si se invierten los polos del imán o el sentido de su desplazamiento.



Figura 11.6
Desplazamiento de un imán para inducir una fem y una corriente

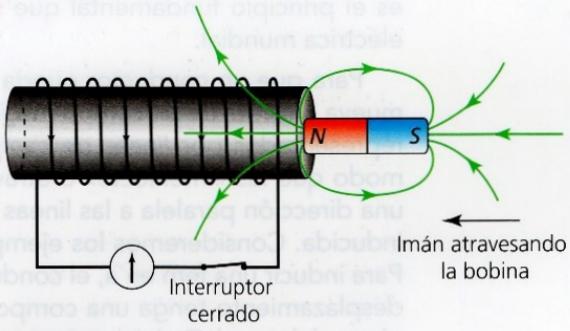
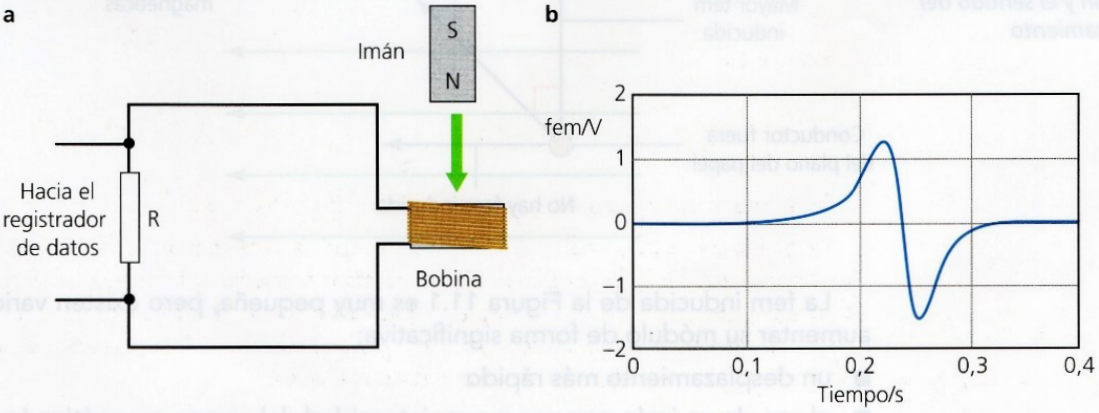


Figura 11.7
Inducción de una fem y una corriente en una bobina

En la Figura 11.8 se representa un experimento de inducción electromagnética cuyos resultados se almacenan en un registrador de datos y en un ordenador. El registrador de datos registra la fem inducida en intervalos de tiempo regulares cuando se introduce un imán a través de una bobina, y posteriormente estos datos se utilizan para dibujar una gráfica.

Figura 11.8
Inducción de una corriente introduciendo un imán en el interior de una bobina



4 En un experimento demostrativo de la inducción electromagnética similar al de la Figura 11.6, se obtiene una corriente inducida muy pequeña.
   a Sugiere dos maneras de aumentar el módulo de la corriente inducida utilizando la misma espira.
   b Sugiere dos modos de hacer que la corriente circule en sentido contrario a través del circuito.

5 Dibuja un esquema similar al de la Figura 11.7 para mostrar la dirección y el sentido de la corriente cuando la barra imantada sale de la bobina por el otro extremo.

6 Sugiere una explicación para la forma de la curva de la Figura 11.8.

Ecuación para la fem inducida cuando un conductor recto se desplaza a través de un campo magnético uniforme

En la Figura 11.9 se representa un conductor de longitud l que se desplaza perpendicularmente con velocidad v a través de un campo magnético uniforme de intensidad B.

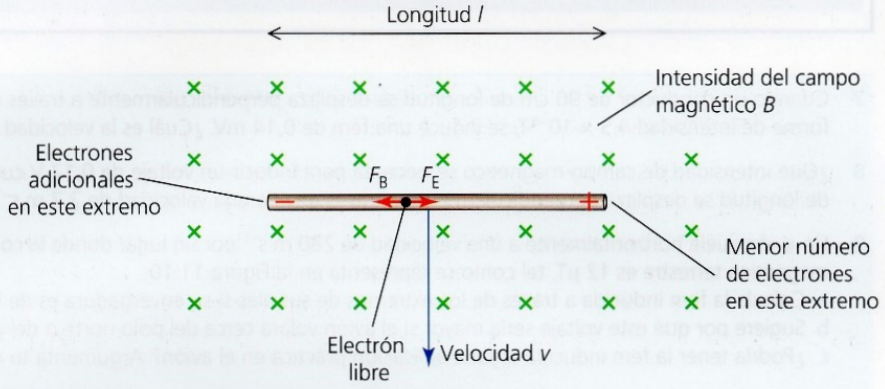


Figura 11.9
Obtención de $\varepsilon = Bvl$

Cada uno de los electrones libres del conductor experimenta una fuerza magnética, F_B, que viene dada por la expresión, $F = qvB$ sen θ (página 250). En esta disposición concreta sen $\theta = 1$. Estas fuerzas tienden a desplazar a los electrones libres hacia la parte izquierda del conductor. Cuantos más electrones se desplazan por el conductor, la cantidad de carga negativa en aumento repele el desplazamiento de más electrones hacia ese extremo. El extremo derecho del conductor, que ha perdido electrones, se carga positivamente y actúa como una fuerza atractiva sobre los electrones.

La separación de carga genera un campo eléctrico a lo largo del conductor, $E = \frac{\varepsilon}{l}$, donde ε es la fem inducida a lo largo de la longitud del conductor (Capítulo 10). La diferencia de potencial inducida máxima tiene lugar cuando la fuerza sobre cada electrón libre debida al campo magnético, F_B, es igual en módulo y opuesta en sentido a la fuerza sobre el electrón, F_E, debida al campo eléctrico (véase Figura 11.9).

$$\text{campo eléctrico} = \frac{\varepsilon}{l}$$

$$\text{fuerza eléctrica, } F_E = \text{campo eléctrico} \times \text{carga} = \frac{\varepsilon q}{l}$$

$$F_E = F_B$$

$$\frac{\varepsilon q}{l} = qvB$$

Por tanto,

$$\varepsilon = Bvl$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Esta ecuación nos indica que la fem inducida es proporcional a la velocidad, la intensidad del campo magnético y la longitud de conductor sometida al campo. Es una ecuación muy útil, pero solo se puede utilizar para un hilo conductor recto moviéndose perpendicularmente a través de un campo magnético. (Si el campo no fuera perpendicular al hilo, en los cálculos se tendría que utilizar la componente del campo en la dirección del hilo).

Si el conductor se enrolla en una bobina rectangular con N vueltas (espiras), la fem inducida cuando uno de los lados de la bobina se desplaza perpendicularmente a través de un campo magnético viene dada por:

$$\varepsilon = BvlN$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Ejemplo resuelto

1 ¿Qué fem se genera a través de un conductor de 23,0 cm de longitud que se desplaza a 98,0 cms^{-1} perpendicularmente a través de un campo magnético de intensidad 120 μT?

$\varepsilon = Bvl$

$\varepsilon = (120 \times 10^{-6}) \times 0{,}98 \times 0{,}23 = 2{,}7 \times 10^{-5}$ V

7 Cuando un conductor de 90 cm de longitud se desplaza perpendicularmente a través de un campo magnético uniforme de intensidad $4{,}5 \times 10^{-4}$ T, se induce una fem de 0,14 mV. ¿Cuál es la velocidad del conductor?

8 ¿Qué intensidad de campo magnético se necesita para inducir un voltaje de 0,12 V cuando un conductor de 1,6 m de longitud se desplaza perpendicularmente a través de él a una velocidad de 2,7 m s^{-1}?

9 Un avión vuela horizontalmente a una velocidad de 280 m s^{-1} por un lugar donde la componente vertical del campo magnético terrestre es 12 μT, tal como se representa en la Figura 11.10.

a Calcula la fem inducida a través de los extremos de sus alas si su envergadura es de 58 m.

b Sugiere por qué este voltaje sería mayor si el avión volara cerca del polo norte o del polo sur.

c ¿Podría tener la fem inducida alguna aplicación práctica en el avión? Argumenta tu respuesta.

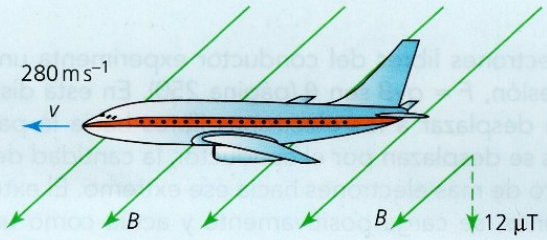


Figura 11.10

10 Una bobina rectangular de hilo de cobre tiene 500 espiras y sus lados tienen una longitud de 5,2 cm y 8,7 cm respectivamente. La bobina rota a una frecuencia de 24 Hz alrededor de un eje que pasa por los centros de los lados más cortos. Sobre la bobina actúa un campo magnético uniforme de 0,58 T en dirección perpendicular al eje.

a Dibuja esquemáticamente esta disposición identificando todos sus elementos.

b Calcula la velocidad de los lados de la bobina.

c ¿Qué fem se induce a través de uno de los lados largos en el instante en que se desplaza perpendicularmente a través del campo?

d ¿Cuál es la fem máxima y la fem mínima cuando la bobina rota?

Flujo magnético y producto del flujo magnético

Flujo magnético

El módulo de la fem inducida depende no solo de la intensidad del campo magnético sino también del área, A, del circuito sobre el que actúa, y del ángulo con el que atraviesa el circuito. Por estas razones es útil introducir y definir el importante concepto de **flujo magnético**.

El flujo magnético, Φ, (de un campo magnético uniforme) se define como el producto del área, A, por la componente de la intensidad del campo magnético perpendicular a esta área, $B \cos \theta$.

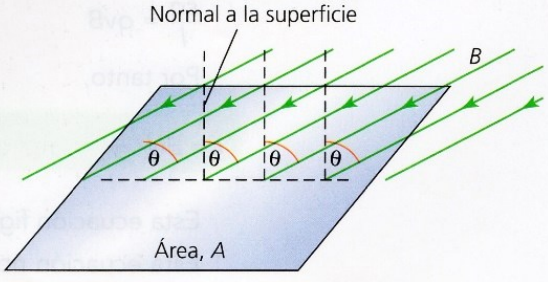


Figura 11.11
El flujo magnético depende de la intensidad del campo, el área y el ángulo

En la Figura 11.11 se ilustra un ejemplo que muestra que el ángulo θ se mide entre la normal al área y la dirección del campo.

$$\Phi = BA\cos\theta$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Si el campo magnético es perpendicular al área, $\theta = 0$ y $\cos\theta = 1$. El flujo es máximo y la ecuación se simplifica a $\Phi = BA$. Si el campo es paralelo al área, el flujo es nulo porque $\cos\theta = 0$.

La unidad para el flujo magnético es el **weber**, Wb. Un weber es igual a un tesla multiplicado por un metro cuadrado ($1\,\text{Wb} = 1\,\text{T m}^2$).

Podemos reagrupar la ecuación para obtener $B\cos\theta = \Phi/A$, que explica por qué la intensidad del campo magnético se conoce en general como **densidad del flujo magnético** (flujo/área).

El concepto de flujo magnético puede ser difícil de entender y la Figura 11.12 puede contribuir a su comprensión. En esta representación se muestra una interpretación no matemática del flujo magnético como el número de líneas de campo magnéticas que atraviesan el área. El flujo también presenta similitudes matemáticas con conceptos del Capítulo 8, en el que la potencia total que fluye a través de un área depende de la intensidad de la radiación electromagnética, el área y el ángulo de incidencia.

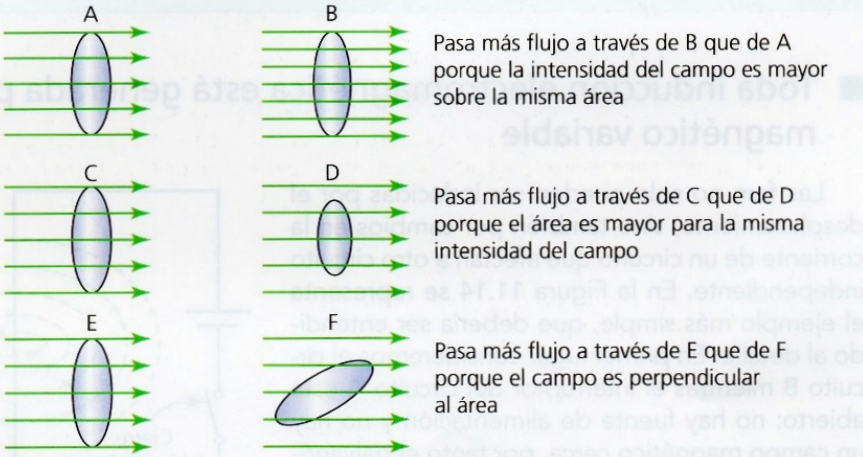


Figura 11.12
Flujo magnético descrito en términos de líneas de campo

Ejemplos resueltos

2 **a** Calcula el flujo magnético en una espira cuadrada de lado 6,2 cm cuando se coloca a 45° en un campo magnético de intensidad $4{,}3 \times 10^{-4}$ T.

b ¿Cuál sería el flujo magnético si solo estuviera sometida al campo la mitad de la espira?

a $\Phi = BA\cos\theta$

$\Phi = (4{,}3 \times 10^{-4}) \times (6{,}2 \times 10^{-2})^2 \times \cos 45°$

$\Phi = 1{,}2 \times 10^{-6}\,\text{Wb}$

b El flujo magnético se reduciría a la mitad porque el área utilizada en los cálculos es el área de espira sometida al campo magnético, no el área total de la espira.

3 En este ejemplo se ofrece una analogía con la radiación solar para ayudar a entender el concepto de flujo. La «densidad de flujo solar» que incide perpendicularmente en las capas altas de la atmósfera terrestre es $1\,360\,\text{W m}^{-2}$. (En el capítulo 8 la denominamos *constante solar*). Supongamos que cerca de la superficie terrestre este valor se ha reducido a $800\,\text{W m}^{-2}$. Calcula la potencia que incide sobre un panel solar horizontal de área $4{,}0\,\text{m}^2$ si la radiación incide con un ángulo de 40° respecto a la superficie (véase Figura 11.13).

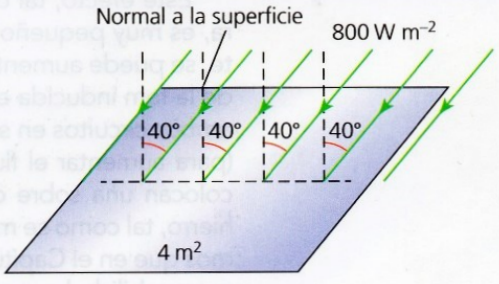


Figura 11.13
Flujo solar

Por analogía con $\Phi = BA\cos\theta$, podemos escribir:

potencia recibida $= 800 \times 4{,}0 \times \cos 40° = 2{,}4 \times 10^3\,\text{W}$

Producto del flujo magnético

El incremento del número de vueltas (espiras), N, de una bobina produce a su vez el incremento proporcional del módulo de la fem inducida. Por este motivo, el concepto de **producto del flujo magnético** es especialmente práctico y se define como el producto del flujo magnético por el número de espiras del circuito. No tiene un símbolo estándar de uso generalizado y sus unidades son las mismas que las del flujo (Wb) aunque en ocasiones se usa la unidad *Wb × n° de espiras*.

producto del flujo magnético = $N\Phi$

Esta ecuación *no* figura en el *Apéndice de datos de Física*.

En el ejemplo resuelto 2a, el *flujo* calculado a través de la bobina es $1{,}2 \times 10^{-6}$ Wb. Si la bobina tuviera 200 espiras, el *producto* del flujo magnético sería $200 \times (1{,}2 \times 10^{-6}) = 2{,}4 \times 10^{-4}$ Wb.

11 Calcula el flujo magnético en una bobina plana de área 48 cm^2 situada en un campo magnético cuya densidad de flujo es $5{,}3 \times 10^{-3}$ T si el campo forma un ángulo de 30° con el plano de la bobina.

12 Un campo magnético de intensidad $3{,}4 \times 10^{-2}$ T atraviesa perpendicularmente una bobina plana con 480 espiras y área $4{,}4 \times 10^{-5}$ m^2. ¿Cuál es el producto del flujo magnético?

13 Una bobina plana con 600 espiras y área 8,7 cm^2 se sitúa en un campo magnético de intensidad $9{,}1 \times 10^{-3}$ T. El eje de la bobina era originariamente paralelo al campo magnético, pero se ha rotado 25°. ¿Qué cambio se ha producido en el producto del flujo magnético a través de la bobina?

Toda inducción electromagnética está generada por un flujo magnético variable

Las fem no solo pueden ser inducidas por el desplazamiento, sino también por cambios en la corriente de un circuito que afectan a otro circuito independiente. En la Figura 11.14 se representa el ejemplo más simple, que debería ser entendido al detalle. En primer lugar consideremos el circuito B mientras el interruptor del circuito A está abierto: no hay fuente de alimentación y no hay un campo magnético cerca, por tanto el galvanómetro no indica circulación de corriente.

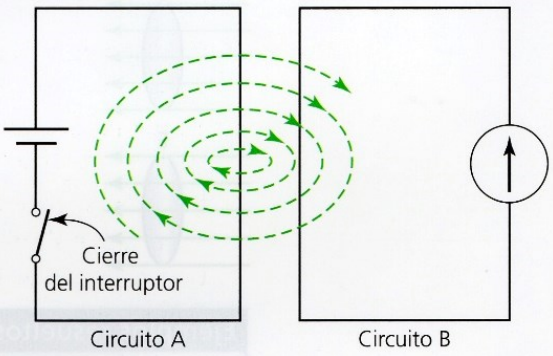


Figura 11.14
Cuando el interruptor se cierra, el (flujo del) campo magnético pasa del circuito A al B

Sin embargo, cuando se cierra el interruptor, comienza a circular por el circuito A una corriente que genera un campo magnético a su alrededor que se propaga y atraviesa el circuito B. La *variación* repentina de flujo magnético induce una fem y una corriente que es detectada por el galvanómetro del circuito B. La corriente *variable* produce un flujo magnético *variable* del mismo modo que lo hace el desplazamiento de un imán.

Esta fem/corriente inducida solo dura un momento, mientras se cierra el interruptor de A, porque cuando la corriente de A es constante ya no hay flujo magnético *variable*. Cuando el interruptor se abre, se genera una fem/corriente en sentido contrario que dura también un momento.

Este efecto, tal como lo hemos descrito hasta ahora, es muy pequeño pero muy importante. No obstante, se puede aumentar de forma significativa el módulo de la fem inducida enrollando los hilos conductores de *ambos* circuitos en sendas bobinas con muchas espiras (para aumentar el flujo y el producto del flujo), que se colocan una sobre otra atravesadas por un núcleo de hierro, tal como se muestra en la Figura 11.15. Recordemos que en el Capítulo 5 vimos que el hierro posee una permeabilidad magnética elevada y que aumenta de forma importante la intensidad del campo magnético.

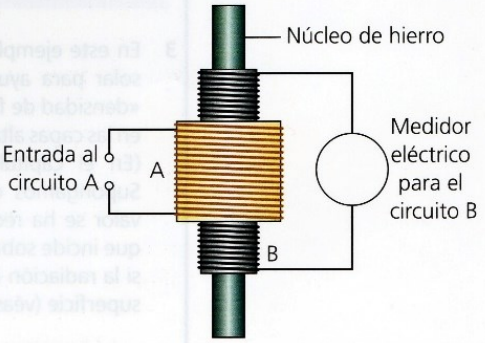


Figura 11.15
Incremento del módulo de la fem inducida mediante el uso de un núcleo de hierro y bobinas con muchas espiras (que aumentan el producto del flujo)

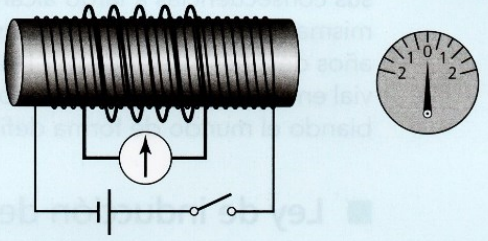
Si cambiamos el tipo de fuente de alimentación del circuito A de manera que en lugar de una corriente continua (CC), que siempre proporciona el mismo valor del voltaje, tengamos una corriente alterna (CA),

el flujo magnético en ambos circuitos *variará continuamente* y se inducirá una fem alterna también continuamente. Este efecto tiene numerosas aplicaciones importantes que trataremos más adelante en este capítulo.

14 **a** En la Figura 11.16 se representan cuatro espiras enrolladas alrededor de un solenoide y conectadas a un galvanómetro con lectura cero central (tal como se muestra a la derecha). Describe y explica qué se leerá en el electrómetro cuando:
- **i** el interruptor esté cerrado
- **ii** el interruptor esté abierto.

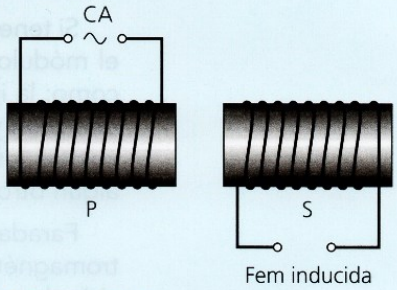
b ¿Cómo cambiaría tu respuesta a **a i** si:
- **i** hubiera 8 espiras enrolladas sobre el solenoide
- **ii** se hubiera colocado un núcleo de hierro en el interior del solenoide?

c ¿Qué se lee en el medidor cuando circula una corriente constante por el solenoide?



■ **Figura 11.16**

15 En la Figura 11.17 se representan dos bobinas enrolladas en tubos de cartón. A través de la bobina P fluye una corriente alterna y se induce una fem variable en la bobina S porque hay un flujo magnético variable. Sugiere cuatro posibles maneras de aumentar el producto del flujo magnético máximo en la bobina S.



■ **Figura 11.17**

Resumen: tres tipos de inducción electromagnética

Para que se induzca una fem en un circuito, este debe ser atravesado por un campo magnético *variable*, lo cual se puede realizar de tres maneras:

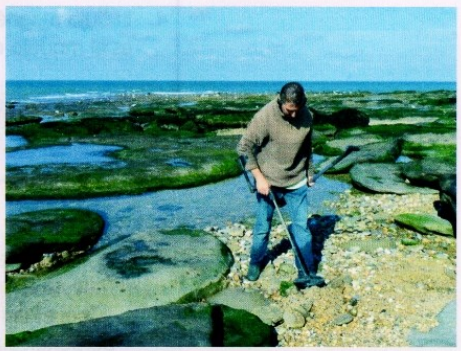
1. Parte del circuito se puede desplazar a través de un campo magnético estacionario (tal como se representa en la Figura 11.1).
2. Un campo magnético, por ejemplo el generado alrededor de una barra imantada, se puede desplazar a través del circuito (tal como se representa en las Figuras 11.6, 11.7 y 11.8).
3. Una corriente variable en un circuito puede generar un campo magnético variable que se propaga y que atraviesa otro circuito (tal como se representa en las Figuras 11.14 y 11.15).

La aplicación más importante de las corrientes inducidas electromagnéticamente es quizá la generación y el transporte de la energía eléctrica (transformadores), pero existen otras muchas, entre las que se encuentran las radiocomunicaciones, el frenado regenerativo, los detectores de metales y los geófonos (unos aparatos que inducen fem a partir del desplazamiento de la superficie terrestre).

Aplicaciones

Detectores de metales

La «caza de tesoros» mediante el uso de un simple detector de metales es un entretenimiento popular. En la Figura 11.18 podemos ver cómo se usa un detector de metales para buscar objetos metálicos, como monedas o anillos, entre las piedras de una playa. Otras aplicaciones son la seguridad en los aeropuertos y la búsqueda de minas enterradas en zonas de guerra.



■ **Figura 11.18**
Caza de tesoros

En el detector de metales, una corriente eléctrica oscilante pasa a través de una bobina y el campo magnético variable atraviesa otra bobina del instrumento e induce una corriente. Si hay algún metal cerca de las bobinas, afecta al campo magnético que las atraviesa y hace variar la corriente inducida. El circuito detecta cualquier cambio de este tipo y normalmente se emite una señal audible. Cuando el campo magnético oscilante original atraviesa el metal, induce una corriente en su interior denominada *corriente de Foucault*, que genera su propio campo magnético.

1. La mayoría de los detectores de los aeropuertos basan su funcionamiento en un sistema de inducción de pulsos (IP). Averigua los principios en los que se basa este sistema.

Naturaleza de la ciencia

Observaciones experimentales aparentemente insignificantes pueden tener enormes consecuencias

En 1831 Michael Faraday (Figura 11.19) se convirtió en el primero en demostrar la inducción electromagnética entre bobinas. Los instrumentos disponibles en la época hacían difícil la observación de este fenómeno y algunos habían dudado incluso de su importancia, pero sus consecuencias a largo alcance son actualmente innegables. De la misma manera, la primera transmisión de ondas de radio más de 50 años después (realizada por Heinrich Hertz) podría haber parecido trivial en aquella época, pero ambos descubrimientos han acabado cambiando el mundo de forma definitiva.

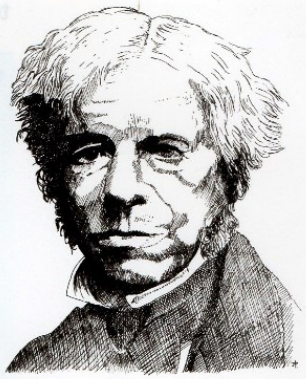


Figura 11.19
Se considera a Michael Faraday (1791–1867) uno de los científicos más importantes de todos los tiempos

Ley de inducción de Faraday

Si tenemos en cuenta los tres tipos de inducción electromagnética, el módulo de la fem inducida puede depender de diversos factores como: la intensidad y el módulo del campo magnético, la velocidad, dirección y sentido del movimiento, el área del circuito, el número de vueltas (espiras) del circuito, si el circuito está rodeado de aire o de algún otro material y la tasa de variación de la corriente eléctrica.

Faraday fue el primer científico que se percató de que *todos* estos ejemplos de inducción electromagnética se podían resumir en una única ley que expresa el hecho de que *cualquier* fem inducida depende de la tasa de variación del producto del flujo magnético.

La ley de inducción electromagnética de Faraday afirma que el módulo de una fem inducida es igual a la tasa de variación del producto del flujo magnético.

$$\varepsilon = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*. El signo negativo tiene su origen en la conservación de la energía, tal como representa la *ley de Lenz* (se explicará más adelante).

Recordando que $\Phi = BA\cos\theta$:

- $\varepsilon = -NB\cos\theta \times (\Delta A/\Delta t)$ se puede aplicar a una situación en la que el área de un circuito varía en un campo constante.
- $\varepsilon = -NA\cos\theta \times (\Delta B/\Delta t)$ se puede aplicar a una situación en la que el campo magnético que atraviesa un circuito fijo varía.

Ejemplo resuelto

4 El flujo magnético a través de una bobina con 1 200 espiras aumenta desde cero a $4{,}8 \times 10^{-5}$ Wb en 2,7 ms. ¿Cuál es el módulo de la fem inducida durante este periodo de tiempo?

$$\varepsilon = -\frac{1\,200 \times (4{,}8 \times 10^{-5})}{2{,}7 \times 10^{-3}} = -21\text{V}$$ (El signo negativo se suele omitir).

16 Una bobina de área 4,7 cm^2 y 480 espiras está sometida a un campo magnético de intensidad $3{,}9 \times 10^{-2}$ T.
- **a** Calcula el producto del flujo magnético máximo posible a través de la bobina.
- **b** ¿Cuál es la fem inducida media cuando la bobina se desplaza a un lugar donde la intensidad del campo magnético perpendicular es $9{,}3 \times 10^{-3}$ T en un tiempo de 0,22 s?

17 Consideremos el circuito de la Figura 11.15. Cuando la entrada al circuito A es una corriente alterna de frecuencia 50 Hz, la fem inducida en el circuito B tiene un valor máximo de 4 V. Sugiere qué le sucedería a la fem inducida del circuito B si la frecuencia del circuito A se duplicara (con el mismo voltaje máximo). Argumenta tu respuesta.

18 En la Figura 11.20 se representa una bobina con 250 espiras que se desplaza desde la posición A (en el exterior de un intenso campo magnético uniforme de intensidad 0,12 T) hasta la posición B (en el centro del campo magnético) en un tiempo de 1,4 s.

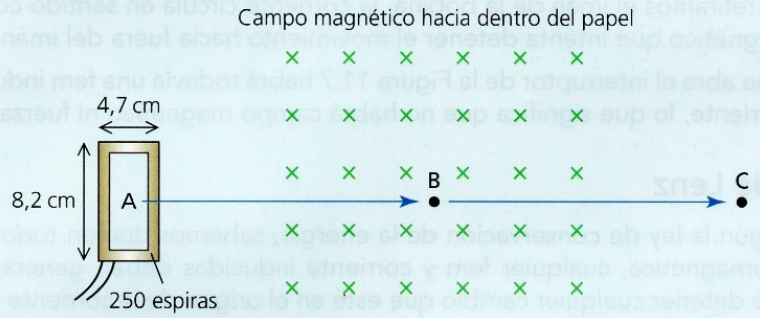
a Calcula la variación del flujo magnético en la bobina cuando se desplaza.

b ¿Qué supuestos has tenido en cuenta?

c ¿Cuál es la variación en el producto del flujo magnético?

d Calcula la fem inducida media.

e Esboza una gráfica en la que se represente la variación en la fem inducida cuando la bobina se desplaza a una velocidad constante desde A hasta B (no es necesario que utilices valores concretos).



■ **Figura 11.20**

19 Imagina que estás sujetando una bobina plana bajo la acción del campo magnético terrestre.

a Dibuja un esquema en el que representes cómo tendrías que sujetar la bobina para que no hubiera flujo magnético a través de ella.

b En un lugar en el que el módulo de la intensidad del campo magnético terrestre es 48 T, ¿qué fem se induciría desplazando una bobina con 550 espiras y un área de 17 cm^2 desde una posición paralela al campo magnético hasta una posición perpendicular a este en 0,50 s?

20 Una pequeña bobina de área 1,2 cm^2 se coloca en el centro de un solenoide largo con un área transversal grande. Una corriente continua de 0,5 A en el solenoide produce un campo magnético de intensidad $8{,}8 \times 10^{-4}$ T.

a ¿Cuántas vueltas (espiras) debe tener la bobina para haber inducido una fem de 2,4 mV cuando la corriente del solenoide ha aumentado hasta 2,0 A en un tiempo de 0,10 s?

b ¿En qué dirección y sentido hay que posicionar la bobina?

21 Considera nuevamente la gráfica de la Figura 11.8.

a ¿Qué magnitud representa el área bajo la curva?

b Compara las áreas por encima y por debajo del eje temporal.

22 Investiga la obra de Michael Faraday y de Nikola Tesla. En tu opinión, ¿cuál de ellos contribuyó más al desarrollo de las teorías del electromagnetismo? Argumenta tu respuesta.

23 Considera nuevamente la pregunta 10.

a ¿Cuál es el flujo magnético máximo a través de la bobina?

b Determina la fem inducida media.

c Compara tu respuesta con la respuesta a la pregunta 10 y explica la diferencia.

■ Transferencia de energía durante la inducción electromagnética

Si se genera una corriente a partir del desplazamiento mediante la inducción electromagnética, se debe haber transferido energía desde el exterior del circuito. (Sabemos que esto es así por la ley de conservación de la energía.) El origen de esta energía se encuentra en la energía cinética del conductor o del imán en movimiento. El objeto en movimiento debe reducir su velocidad a medida que pierde parte de su energía cinética (a menos que haya una fuerza que lo mantenga en movimiento).

Por ejemplo, los imanes de las Figuras 11.7 y 11.8 que se desplazan por el interior de las bobinas deben experimentar fuerzas que los frenan (que *se oponen* a su movimiento). Esto significa que se debe realizar un trabajo para desplazar los imanes por el interior de las bobinas y esta energía se transfiere a la corriente inducida electromagnéticamente. Para comprender por qué hay una fuerza que se opone al movimiento debemos recordar los conceptos sobre los campos magnéticos generados por corrientes que estudiamos en el Capítulo 5. Si por la bobina de la Figura 11.7 circula

una corriente (inducida), entonces la bobina se comporta como un imán. La dirección y sentido de la corriente convierte el extremo cercano al imán permanente en un polo norte (se puede predecir mediante la regla del sacacorchos con la mano derecha). Los dos polos norte se repelen y se produce una fuerza repulsiva que se opone al movimiento. Si la corriente inducida circulara en sentido contrario, la fuerza sería atractiva y el imán ganaría energía cinética, lo cual entraría en conflicto con la ley de conservación de la energía.

Si se invierte la polaridad del imán que se desplaza por el interior de la bobina, la corriente inducida circula en sentido contrario y en ese caso nos encontramos con dos polos sur que se repelen. Si retiramos el imán de la bobina, la corriente circula en sentido contrario y se genera un campo magnético que intenta detener el movimiento hacia fuera del imán.

Si se abre el interruptor de la Figura 11.7 habrá todavía una fem inducida, pero no así circulación de corriente, lo que significa que no habrá campo magnético ni fuerza generada desde la bobina.

Ley de Lenz

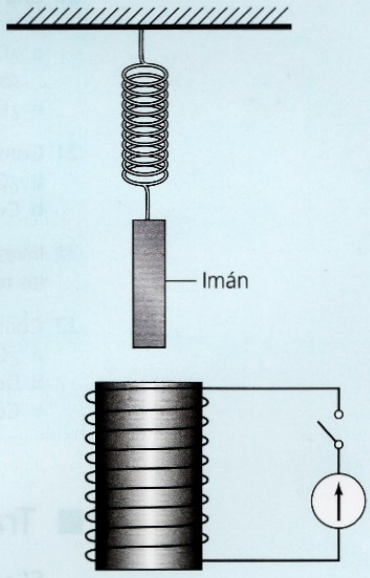
Según la ley de conservación de la energía, sabemos que en *todos* los ejemplos de inducción electromagnética, cualquier fem y corriente inducidas deben generar un campo magnético que intente detener cualquier cambio que esté en el origen de la corriente inducida. Esta ley se conoce como **ley de Lenz**.

La ley de Lenz afirma que la dirección y sentido de una fem inducida siempre *se opone* al cambio que la ha originado. Esto se representa matemáticamente mediante el signo negativo que aparece en la ecuación de la ley de Faraday.

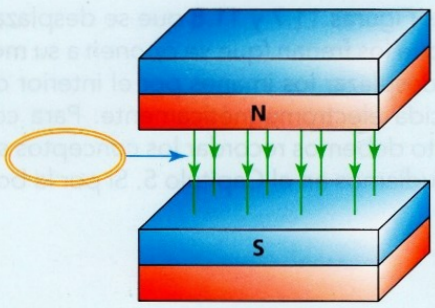
24 En la Figura 11.21 se representa una barra imantada que cuelga del extremo inferior de un muelle situado cerca de una bobina.
- **a** Se tira del imán para que su extremo inferior entre dentro de la bobina y a continuación se suelta. Esboza una gráfica donde se represente la variación temporal de la posición del imán durante unos pocos segundos.
- **b** Indica sobre los mismos ejes la variación de la fem inducida a través de la bobina.
- **c** Sugiere qué diferencias se observarán si se cierra el interruptor mientras el imán está oscilando. Argumenta tu respuesta.

25 Cuando se deja caer un imán potente por el interior de un tubo de cobre tarda bastante más en alcanzar el suelo que cuando se deja caer fuera del tubo. Explica esta observación.

26 El anillo de hilo conductor que se representa en la Figura 11.22 está viajando a una velocidad constante cuando entra en el campo magnético.
- **a** Explica por qué se decelera el anillo.
- **b** ¿Actúa la parte superior del anillo como un polo norte o como un polo sur?
- **c** ¿En qué dirección y sentido circula la corriente en el lado del anillo que entra primero en el campo magnético?
- **d** ¿Por qué no hay ni fem ni corriente inducidas mientras el anillo atraviesa el centro del campo magnético?
- **e** Argumenta qué sucede cuando el anillo abandona el otro lado del campo.
- **f** ¿Qué le sucede a la energía cinética transferida por el anillo como consecuencia de la reducción de su velocidad?



■ **Figura 11.21**



■ **Figura 11.22**

Aplicaciones

Corrientes de Foucault y cocina con placas de inducción

En una placa de inducción, como la de la Figura 11.23a, hay unas bobinas bajo la superficie de cocción (llamadas *serpentines de calentamiento*). Cuando las atraviesa una corriente de alta frecuencia, se genera un campo magnético intenso que oscila con gran rapidez y que atraviesa a su vez cualquier objeto que esté situado sobre la placa de cocción o cerca de esta, como puede ser una cazuela. Si el material con el que está fabricada es un conductor, se inducen fem y corrientes sobre este. Las corrientes que circulan por el interior de conductores sólidos se denominan *corrientes de Foucault*, y son distintas de las corrientes que circulan por circuitos compuestos por hilos conductores.

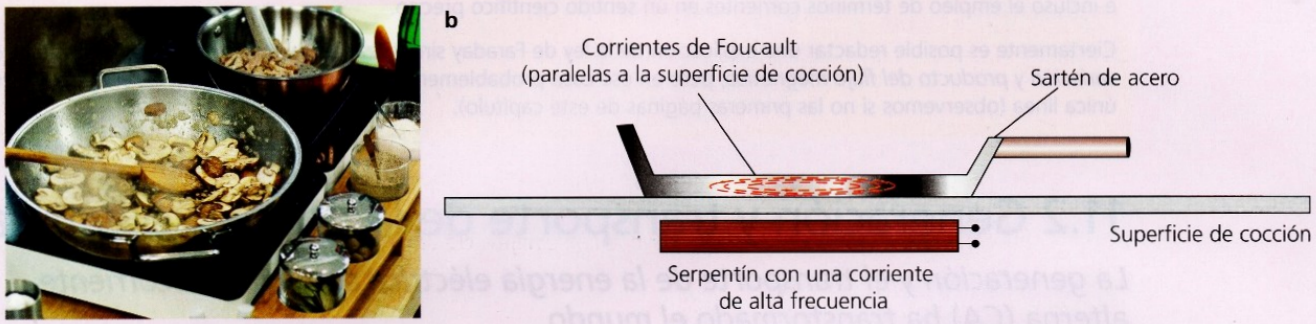


Figura 11.23
a *Una sartén de acero sobre una placa de inducción* **b** *Funcionamiento de una placa de inducción*

La energía eléctrica de las corrientes de Foucault se transfiere en forma de energía interna que calienta la sartén. Como en cualquier circuito, la potencia generada se puede calcular mediante la expresión $P = I^2R$. La energía térmica se transfiere por conducción al alimento que se está cocinando en la sartén.

La elección del metal con el que está fabricada la sartén es importante: el cobre, por ejemplo, presenta una resistividad baja y además conduce bien la energía térmica. (No se trata de una coincidencia: la capacidad para conducir energía térmica y la capacidad para conducir la electricidad están relacionadas, ya que ambas dependen del número de electrones libres por unidad de volumen del material). Sin embargo, el cobre no es una buena elección para sartenes que se vayan a utilizar con una placa de inducción porque no presenta buenas propiedades magnéticas. Es necesario que las sartenes se fabriquen con un material de alta permeabilidad; en otras palabras, con un material como el hierro o el acero, de manera que se aumente de forma importante la intensidad del campo magnético en la sartén. (En la fabricación de algunas sartenes de uso específico con placas de inducción se emplea una combinación de diferentes metales).

Las placas de inducción presentan como mínimo dos importantes ventajas:

- La propia placa no se calienta de forma perceptible (excepto por la energía térmica transferida por la sartén). Esto significa que las placas de inducción representan un modo seguro, rápido y razonablemente eficiente de cocinar.
- El proceso de calentamiento se puede controlar por completo, ya que se pueden encender y apagar mediante un interruptor.

Las placas de inducción son más eficientes para cocinar que las placas eléctricas convencionales, y ambas lo son mucho más que las placas de gas (aunque en esta afirmación no se tienen en cuenta las ineficiencias de la producción de energía eléctrica). La razón por la que no se utilizan de forma más generalizada es porque su coste es muy superior al de las placas de gas o las placas eléctricas convencionales (en gran parte a causa de los electrones adicionales necesarios), y además requieren el uso de recipientes de cocción específicos. Las placas pequeñas de inducción pueden ser la elección ideal en lugares donde el espacio es limitado, la seguridad es prioritaria y no se necesita horno.

1 Sugiere por qué no es posible diseñar y fabricar un horno de inducción eficiente.

2 ¿Por qué se utilizan corrientes de alta frecuencia en los serpentines de calentamiento de una placa de inducción?

3 Explica por qué, aunque las placas de inducción son mucho más eficientes que las de gas, ambas crean aproximadamente la misma «huella de carbono».

Enlace con la teoría del conocimiento

El uso de terminología científica puede dificultar la comunicación con el público no especializado

La terminología empleada en la teoría electromagnética es extensa y puede confundir a las personas que no tienen una relación directa con este ámbito. ¿Qué efecto puede tener la falta de claridad en la terminología a la hora de comunicar conceptos científicos al público en general?

La ley de Faraday afirma que la fem inducida es igual a la tasa de variación del producto del flujo magnético. Un buen estudiante de física reconocerá que se trata de una manera elegante y precisa de expresar un concepto muy importante. Sin embargo, para una persona no especializada puede parecer un idioma extranjero. El objetivo de los científicos es expresar ideas de la forma más breve y sucinta posible, en especial cuando se comunican con otros científicos. Para ello se requiere el uso de **terminología científica**, que incluye la introducción de palabras nuevas para ideas nuevas e incluso el empleo de términos corrientes en un sentido científico preciso.

Ciertamente es posible redactar una explicación de la ley de Faraday sin utilizar las expresiones *fem inducida, tasa de variación* y *producto del flujo magnético*, pero en ese caso probablemente harían falta varias páginas en lugar de una única línea (observemos si no las primeras páginas de este capítulo).

11.2 Generación y transporte de la energía eléctrica

La generación y el transporte de la energía eléctrica en forma de corriente alterna (CA) ha transformado el mundo

Generadores de corriente alterna (CA)

Observemos la Figura 11.24, en la que se representa una espira de una bobina entre los polos de un imán. (Por simplicidad se muestra una única espira, pero en la práctica la bobina tiene un gran número de vueltas). Si la espira rota, habrá un flujo magnético variable atravesándola y se inducirá una fem variable. Cuando el lado WX se desplaza hacia arriba, la fem inducida hace que circule una corriente hacia el interior de la página (si la fem está conectada a un circuito). Al mismo tiempo, cualquier corriente inducida en YZ circula hacia fuera de la página, porque se mueve en sentido opuesto. Así, circula corriente continuamente alrededor de la espira.

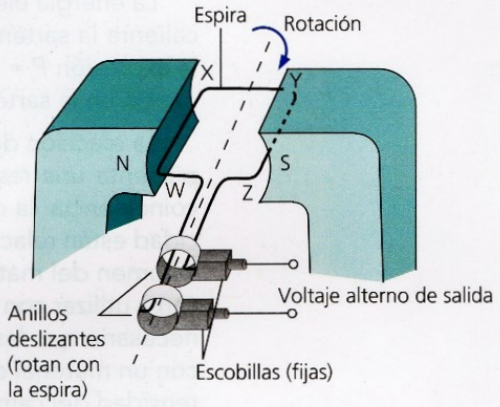


Figura 11.24
Generador de CA simple

La conexión entre la espira y el circuito externo no puede ser fija y permanente porque los hilos conductores se retorcerían con la rotación de la espira. Por tanto, se utilizan «**escobillas**» **de grafito** para establecer contacto con los **anillos deslizantes** que rotan solidariamente con la espira, de modo que la corriente inducida pueda circular hacia un circuito externo.

En la Figura 11.25 se representan tres vistas laterales de la espira en rotación. En la Figura 11.25a el plano de la espira es paralelo al campo magnético y, en ese momento, los lados WX y YZ intersectan el campo magnético con la máxima tasa, de manera que se induce la máxima fem. En la Figura 11.25b los lados WX y YZ se mueven paralelamente al campo magnético, de manera que en ese momento no se induce ninguna fem. En la Figura 11.25c la fem vuelve a ser máxima, pero en sentido contrario porque los lados se mueven también en sentido contrario al de la Figura 11.25a.

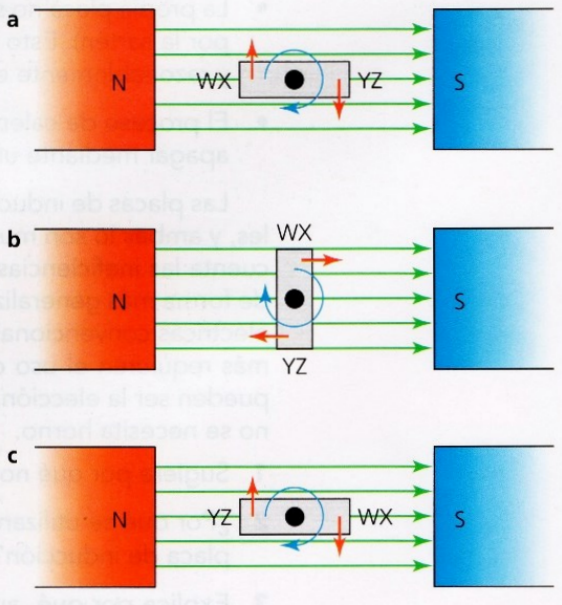


Figura 11.25
Los lados de la espira intersectan el campo magnético en distintos ángulos a medida que rotan, de modo que la fem producida es alterna

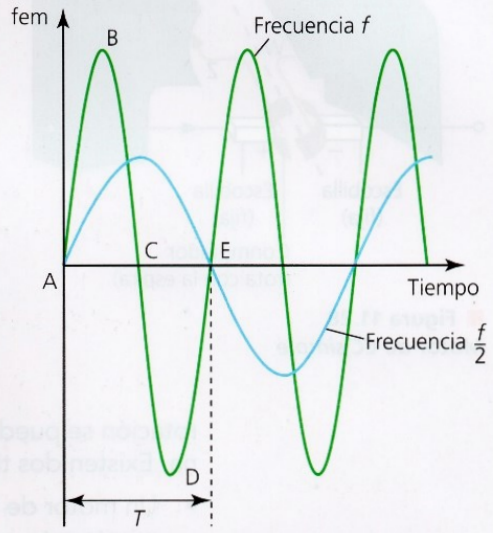
El resultado global de la rotación a velocidad constante de una espira en un campo magnético uniforme es la inducción de una fem que varía **sinusoidalmente**. Este efecto se representa mediante la curva de color verde de la Figura 11.26. En las posiciones B y D el plano de la espira es paralelo al campo magnético. En A, C y E el plano de la espira es perpendicular al campo. La espira tarda un tiempo T en completar una revolución y la frecuencia, f, es igual a $1/T$.

Si la espira rota a una frecuencia menor (número menor de rotaciones por segundo), la tasa de variación del flujo magnético que la atraviesa será menor y la fem inducida será también menor. Por ejemplo, si la frecuencia se reduce a la mitad, la tasa de variación del producto del flujo magnético se reduce a la mitad y, por tanto, la fem inducida se reduce también a la mitad, mientras que el periodo se duplica. Este efecto se representa mediante la curva de color azul de la Figura 11.26. Para comprender bien este proceso es recomendable que los estudiantes observen una simulación de ordenador de un generador de CA en el que las espiras roten lentamente.

La energía eléctrica mundial se genera de este modo, mediante generadores de CA. Para rotar las paletas de turbina se pueden emplear las fuerzas proporcionadas, por ejemplo, por el vapor a alta presión liberado en la combustión de combustibles de origen fósil (tal como se explica en el Capítulo 8). Las paletas de turbina están sujetas a bobinas de gran tamaño situadas dentro de un generador de CA. Las bobinas (con muchas espiras y núcleos con una permeabilidad magnética elevada) rotan bajo campos magnéticos intensos por la acción de las paletas de turbina.

También se puede generar electricidad mediante el mismo principio pero con el campo magnético rotando en el interior del circuito en lugar de ser al revés. Estos aparatos se utilizan normalmente en coches y se suelen denominar *alternadores*.

(Observemos que los generadores de CC son similares a los de CA en cuanto a diseño básico, pero en el primer caso es necesario modificar las conexiones al circuito externo).

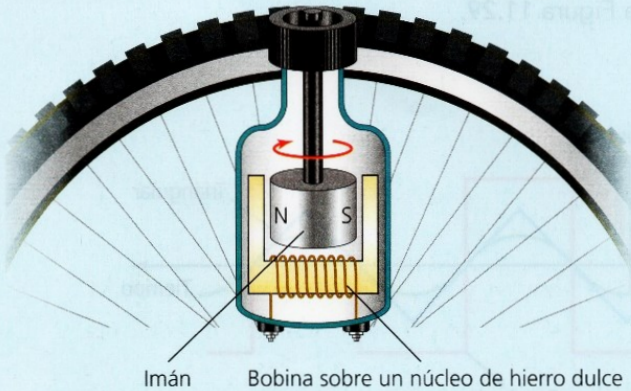


■ **Figura 11.26**
Comparación entre las fem inducidas a distintas frecuencias

27 Observa la Figura 11.24.
a Explica por qué no se induce fem a través del extremo rotatorio de la espira, XY.
b Enumera cuatro maneras de aumentar la fem inducida.

28 Un generador de CA genera una fem sinusoidal de frecuencia 30 Hz y valor máximo 9,0 V.
a Esboza una gráfica fem-tiempo para representar la variación de la salida del generador durante un intervalo de tiempo de 0,1 s.
b Superpón una segunda curva a tu gráfica para representar la salida del mismo generador si la frecuencia se reduce a 10 Hz.

29 En la Figura 11.27 se muestran los detalles básicos para la construcción de una dinamo de bicicleta. Explica su funcionamiento.



■ **Figura 11.27**
Una dinamo de bicicleta simple

Aplicaciones

Fem inducidas: motores

Los motores eléctricos simples son análogos a los generadores en lo que respecta a su diseño básico: ambos consisten en espiras que rotan en el interior de un campo magnético. En el Capítulo 5 vimos que cuando hacemos circular una corriente a través de un campo magnético, sobre la corriente actúa una fuerza. En los motores eléctricos, como la versión simplificada que se representa en la Figura 11.28, las fuerzas que van en sentidos contrarios y que actúan sobre lados opuestos de una espira conductora provocan la rotación continua de la espira. Comparemos el generador de CA simple de la Figura 11.24 con el motor de CC simple de la Figura 11.28.

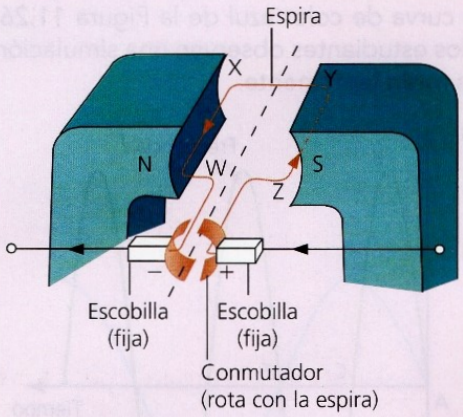


Figura 11.28
Motor de CC simple

Cuando una espira del motor rota, se genera una inducción electromagnética y se induce una fem a través de la espira que tiende a oponerse a su movimiento (ley de Lenz). En otras palabras, cuando se aplica una diferencia de potencial a una espira de un motor para hacerla rotar, el movimiento induce otra diferencia de potencial en sentido contrario que intenta detener la rotación. A esta fem se le suele denominar «fuerza contraelectromotriz».

En el caso de un motor de CC eficiente y bien diseñado, que rota libremente sin realizar ningún trabajo útil, la fuerza contraelectromotriz puede ser casi tan elevada como la d.p. aplicada, por tanto la d.p. resultante es apenas suficiente para impulsar una pequeña corriente a través de la espira y proporcionar la (poca) potencia necesaria. Sin embargo, cuando el motor realiza un trabajo útil, por ejemplo levantar un peso, la velocidad de rotación disminuye y la fuerza contraelectromotriz se reduce (como consecuencia del descenso de la tasa de variación del producto del flujo magnético). La d.p. y la corriente resultantes aumentan para proporcionar la potencia adicional necesaria.

Una de las ventajas que presentan los motores de CC es que la velocidad de rotación se puede controlar fácilmente, pero la mayoría de motores funcionan con corriente alterna. Existen dos tipos principales de motores que funcionan con corriente alterna:

- Un motor de CA sincrónico utiliza anillos deslizantes (como los generadores de CA) y normalmente rota con la misma frecuencia que la CA suministrada.
- Un motor de CA de inducción utiliza la inducción electromagnética para transferir la energía a la espira.

1 Explica por qué se necesita un conmutador de anillo dividido y una escobilla (como se muestra en la Figura 11.28) para la rotación de un motor alimentado con corriente continua.

2 Busca información sobre el funcionamiento básico de un motor de inducción.

Corrientes alternas y corrientes continuas

Cuando se dice que una corriente es **alterna**, significa que el *sentido* de la corriente cambia (normalmente de forma regular), y esto se representa gráficamente mediante valores tanto positivos como negativos. Hemos visto que la salida de un generador de CA generalmente es sinusoidal, pero también son posibles otras formas de onda, como las ondas cuadradas y triangulares que se representan en la Figura 11.29.

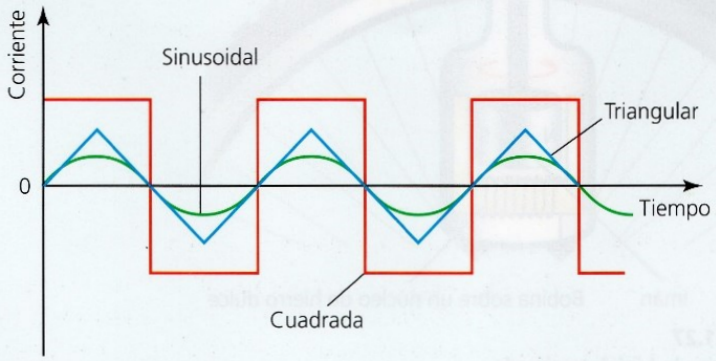


Figura 11.29
Representación gráfica de corrientes alternas con distintas formas de onda y la misma frecuencia, aunque con distintas amplitudes.

Una **corriente continua** circula por el circuito en el mismo sentido (se representa gráficamente mediante una recta horizontal siempre positiva o negativa), aunque su módulo puede variar.

La energía eléctrica se genera y se transporta principalmente utilizando corrientes alternas a causa de la necesidad de reducir pérdidas de energía. Como veremos más adelante en este mismo apartado, su transporte requiere altos voltajes y para obtenerlos hacen falta **transformadores** que puedan cambiar (transformar) los voltajes, aumentándolos o disminuyéndolos. Los transformadores simples solo pueden funcionar con corriente alterna, aunque también se puede transformar corriente continua.

Muchos de los aparatos eléctricos que utilizamos en nuestros hogares se pueden diseñar para funcionar con CA o con CC directamente, pero algunos solo pueden funcionar con una fuente de alimentación de CC. Por ejemplo, los dispositivos electrónicos requieren CC, por tanto en su diseño se debe incluir un convertidor de CA en CC (rectificador).

Potencia media y valor cuadrático medio (rms) de la intensidad de corriente y del voltaje

En la Figura 11.31 se representan el voltaje, la intensidad y la potencia variables en un circuito con un resistor óhmico. Se representan sobre los mismos ejes para facilitar su comparación. Los «valores pico» (máximos) del voltaje y de la intensidad de corriente están marcados como V_0 y I_0. La forma de onda del voltaje se puede visualizar fácilmente con un osciloscopio conectado al resistor.

La intensidad de corriente en cada instante de tiempo viene dada por $I = V/R$ y la potencia instantánea por $P = V\,I$.

La potencia máxima está determinada por:

$$P_{max} = I_0 V_0$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

La potencia es variable, pero siempre se mantiene positiva porque el voltaje y la intensidad de corriente son o bien ambos positivos o bien ambos negativos. Esto significa que la potencia siempre circula *desde* la fuente de alimentación hacia el circuito. (Solo es cierto para circuitos que se puedan considerar puramente resistivos). La potencia transferida al resistor no depende del sentido de circulación de la intensidad de corriente.

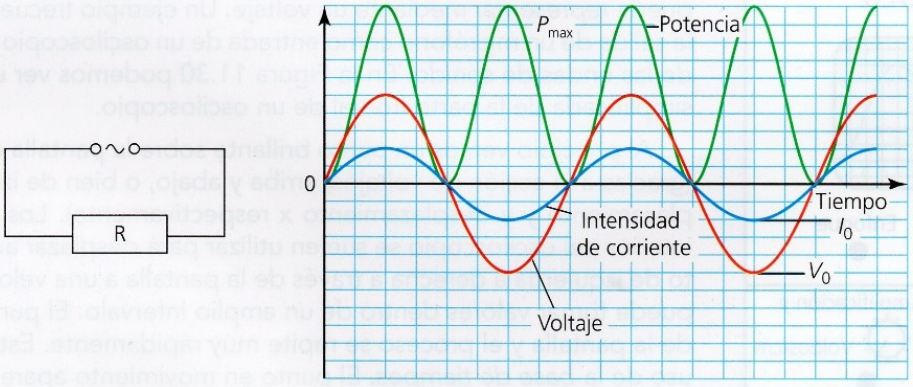


Figura 11.31 *Voltaje, intensidad de corriente y potencia oscilantes para un circuito con un resistor y una fuente de alimentación de CA*

Tanto la variación del voltaje como la de la intensidad de corriente son sinusoidales, lo que significa que cuando se multiplican, la variación de la potencia ($P = V\,I$) sigue una *relación según el cuadrado del seno*. Para este tipo de relación, el valor medio de la potencia, $\overline{P}$, es exactamente la mitad del valor máximo:

$$\overline{P} = \frac{1}{2} I_0 V_0$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Los valores *eficaces* de la intensidad de corriente y del voltaje son los valores que proporcionan la *potencia* media; no son los valores medios del voltaje y de la intensidad de corriente, que son ambos nulos, pero sí son menores que los valores máximos. Para determinar la relación entre el valor máximo y el valor eficaz de la intensidad de corriente y del voltaje se puede utilizar la ecuación:

$$P_{media} = I_{eficaz} \times V_{eficaz} = \frac{1}{2} I_0 V_0 = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \times \frac{V_0}{\sqrt{2}}$$

El valor eficaz de una intensidad (o de un voltaje) de corriente alterna es por tanto su valor máximo dividido por $\sqrt{2}$. El valor eficaz se denomina también **valor cuadrático medio** (**valor rms**, por sus siglas en inglés) o *valor de servicio*.

El valor rms (valor de servicio) que se da a una intensidad (o a un voltaje) de corriente alterna, corresponde al valor de la intensidad (o voltaje) de corriente continua que disiparía potencia en un resistor óhmico a la misma tasa.

Esto significa, por ejemplo, que 230 V de CA y 230 V de CC transfieren energía en un resistor a la misma tasa, aunque el voltaje alterno asciende hasta un máximo de $230 \times \sqrt{2} = 325$ V, mientras que el voltaje de CC se mantiene constante en el valor 230 V.

$$I_{rms} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

$$V_{rms} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}$$

Estas ecuaciones figuran en el *Apéndice de datos de Física*.

Las ecuaciones $R = V/I$ y $P = VI = I^2R = V^2/R$ se pueden utilizar en circuitos de CA empleando los valores máximos o bien los valores rms (valores eficaces), pero *no* se deben mezclar, por tanto:

$$R = \frac{V_0}{I_0} = \frac{V_{rms}}{I_{rms}}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Perspectivas adicionales

Osciloscopios

Los osciloscopios son uno de los componentes electrónicos más útiles que podemos encontrar en un laboratorio de física o de electrónica. Funcionan como voltímetros que permiten observar diferencias de potencial que varían y se repiten rápidamente, y se suelen utilizar para dibujar gráficas voltaje-tiempo para intervalos cortos de tiempo. Sin embargo, en la pantalla no solo se pueden visualizar voltajes, sino cualquier magnitud física que se pueda *representar* mediante un voltaje. Un ejemplo frecuente podría ser el uso de la salida de un micrófono como entrada de un osciloscopio para visualizar el patrón de las ondas de sonido. En la Figura 11.30 podemos ver una representación muy simplificada de la parte frontal de un osciloscopio.

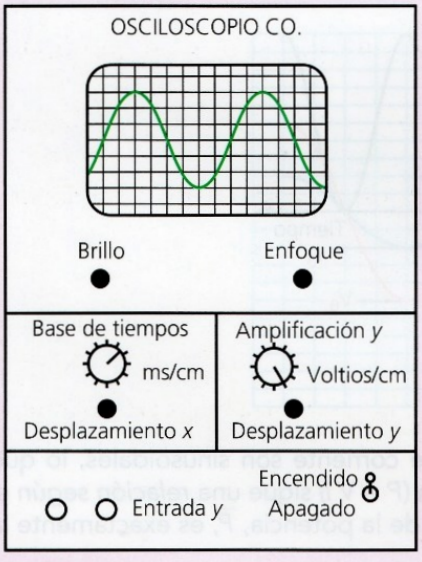


Figura 11.30
Un osciloscopio simplificado

Al principio vemos un punto brillante sobre la pantalla que se puede desplazar (gracias a la acción de voltajes) arriba y abajo, o bien de izquierda a derecha (desplazamiento *y* y desplazamiento *x* respectivamente). Los circuitos que hay en el interior del osciloscopio se suelen utilizar para desplazar automáticamente el punto de izquierda a derecha a través de la pantalla a una velocidad determinada que puede tomar valores dentro de un amplio intervalo. El punto vuelve a la izquierda de la pantalla y el proceso se repite muy rápidamente. Este proceso se denomina uso de la *base de tiempos*. El punto en movimiento aparece como una línea horizontal a menos que la velocidad sea muy lenta.

Como cualquier voltímetro, el osciloscopio se conecta al componente cuya d.p. se desea estudiar mediante la entrada *y*. Si, por ejemplo, se suministra un voltaje sinusoidal a la entrada *y* a la vez que una base de tiempo adecuada desplaza el punto en la dirección *x*, podemos visualizar en la pantalla una *traza* como la de la Figura 11.30, siempre y cuando la ganancia *y* (amplificación) esté ajustada a un valor adecuado.

1 Si los cuadrados de la imagen de la Figura 11.30 tienen dimensiones 1 cm × 1 cm y los ajustes del osciloscopio son $50\,V\,cm^{-1}$ y $4\,ms\,cm^{-1}$, calcula:

a el voltaje máximo

b el voltaje rms (voltaje eficaz)

c el periodo

d la frecuencia.

Ejemplos resueltos

5 El resistor del circuito de la Figura 11.31 tiene una resistencia de 47 Ω y la fuente de alimentación tiene un voltaje máximo (pico) de 12 V. ¿Cuál es la intensidad eficaz (rms) del circuito?

$$I_0 = \frac{V_0}{R} = \frac{12}{47} = 0{,}255 \text{ A}$$

$$I_{rms} = \frac{0{,}255}{\sqrt{2}} = 0{,}18 \text{ A}$$

6 Observa la Figura 11.32, en la que se representa la variación temporal de una fuente de d.p. alterna.

a ¿Cuál es el valor máximo del voltaje?
b ¿Cuál es el voltaje eficaz (rms) de esta fuente?
c ¿Cuál es su periodo y su frecuencia?
d Si esta fuente estuviera conectada a un resistor de 64 Ω, ¿cuál sería la intensidad máxima y la intensidad eficaz (rms)?

a ±6,0 V

b $\frac{6{,}0}{\sqrt{2}} = 4{,}2 \text{ V}$

c $T = 8{,}0 \times 10^{-2}$ s

$f = \frac{1}{T} = 12{,}5$ Hz

d $I_0 = \frac{V_0}{R} = \frac{6{,}0}{64} = 0{,}094$ A

$I_{rms} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = \frac{0{,}094}{1{,}414} = 0{,}066$ A

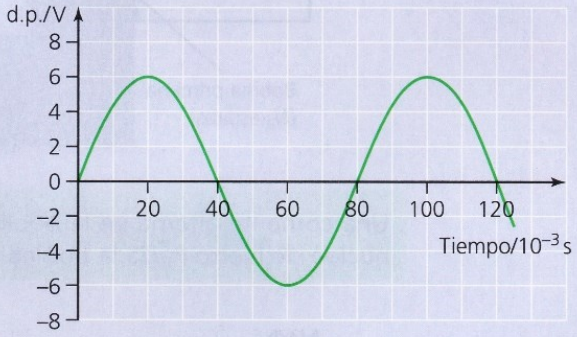


Figura 11.32

30 **a** El valor máximo de la potencia de un circuito como el de la Figura 11.31 es 14 W, ¿cuál es la potencia media?
b El valor eficaz (rms) del voltaje es 25 V, ¿cuál es el valor de la resistencia?

31 **a** En un país en el cual el voltaje de servicio de la red eléctrica es 230 V, ¿cuál es el valor máximo del voltaje?
b ¿Cuál es el valor máximo de la intensidad de corriente a través de un calentador eléctrico con una potencia de servicio de 2,15 kW en ese mismo país?
c ¿Cuál es la intensidad eficaz (rms) a través del calentador?
d Si el mismo calentador se lleva a otro país donde el voltaje de servicio es 110 V, ¿cuál es su tasa media de transferencia de energía?

32 ¿Cuál es el voltaje eficaz (rms) a través de una bombilla cuya potencia media es 60 W cuando circula una corriente alterna de valor máximo 0,36 A?

33 **a** ¿Cuál es la potencia media disipada en un resistor de 24,0 Ω cuando se le aplica un voltaje alterno de valor máximo 150 V?
b Si se duplica el valor eficaz (rms) del voltaje, ¿cuál será la nueva potencia?
c ¿Qué supuestos has tenido en cuenta?

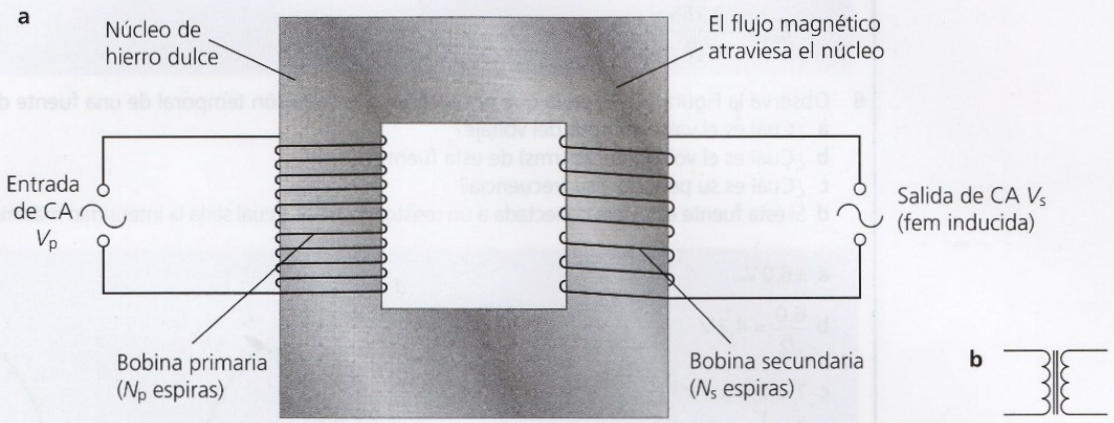
34 Un calentador de agua cuya potencia de servicio es 2,0 kW está diseñado para funcionar con un voltaje de servicio de 250 V y una frecuencia de 60 Hz.
a Calcula los valores máximos de la potencia, el voltaje y la intensidad de corriente.
b Esboza tres gráficas sobre unos mismos ejes donde se represente la variación del voltaje, la intensidad y la potencia a lo largo de 0,03 s. Incluye valores numéricos.

Transformadores

El transporte de energía eléctrica desde las centrales eléctricas hasta las comunidades requiere el uso de voltajes mucho mayores que los considerados de uso seguro en los hogares (o que los generados en las centrales eléctricas). Por tanto, es necesario cambiar (transformar) los voltajes entre distintos valores, un proceso que realizan los aparatos denominados **transformadores**. En nuestros hogares también los utilizamos siempre que necesitamos un voltaje distinto al suministrado por la red. Por ejemplo, podemos desear cargar un teléfono móvil a 4 V en un país donde la red eléctrica suministra un voltaje de 110 V.

Los transformadores se basan en el principio de la inducción electromagnética y, como este requiere flujos magnéticos variables con el tiempo, los transformadores simples solo pueden funcionar conectados a corriente alterna, y no a corriente continua. En la Figura 11.33 se muestra la estructura de un transformador simple.

El voltaje de entrada que deseamos transformar se conecta a una bobina denominada **bobina primaria**. El voltaje de salida se obtiene a partir de otra bobina denominada **bobina secundaria**. Ambas bobinas están enrolladas sobre el mismo **núcleo ferromagnético** (**hierro dulce**) que normalmente forma un circuito cerrado, incluso cuando las bobinas están enrolladas una frente a la otra (como sucede habitualmente). El núcleo ferromagnético posee una elevada permeabilidad magnética que aumenta la magnitud del flujo magnético que atraviesa las bobinas.



■ **Figura 11.33**
a *Estructura de un transformador simple y* **b** *símbolo de circuito para un transformador*

Una corriente alterna en la bobina primaria genera un flujo magnético alterno que atraviesa el núcleo de hierro hacia la bobina secundaria e induce una fem.

$$\mathcal{E} = -\frac{N\Delta\Phi}{\Delta t}$$

La fem inducida en una disposición como la de la Figura 11.33a puede verse afectada por muchos factores y se pueden llevar a cabo interesantes estudios.

Cuanto mayor es el número de espiras de la bobina secundaria, mayor es el voltaje de salida (para una disposición determinada).

En un **transformador ideal**, los voltajes de entrada y salida, y el número de espiras están relacionados por la ecuación siguiente:

$$\frac{\mathcal{E}_p}{\mathcal{E}_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Esta ecuación sugiere que si escogemos un cociente adecuado (relación de transformación) entre el número de espiras de ambas bobinas (N_p/N_s), un transformador ideal podría, en teoría, transformar cualquier voltaje alterno en otro voltaje. Los transformadores empleados para aumentar voltajes se denominan **transformadores elevadores**, mientras que los empleados para reducir voltajes se denominan **transformadores reductores**.

Un transformador ideal es 100% eficiente, de manera que la potencia en la bobina primaria es igual a la potencia en la secundaria.

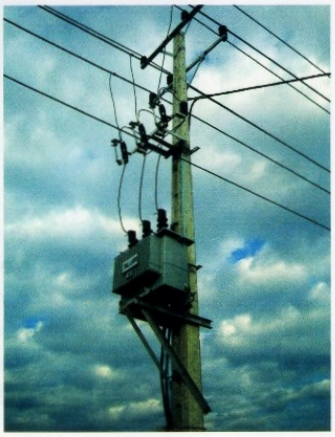
$$\mathcal{E}_p I_p = \mathcal{E}_s I_s$$

Esta relación también se puede expresar como:

$$\frac{\mathcal{E}_p}{\mathcal{E}_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Un transformador que eleva el voltaje debe reducir la intensidad de corriente. Un transformador reductor debe tener una intensidad de corriente aumentada en la bobina secundaria. En los transformadores reales, como el de la Figura 11.34, se disipa algo de energía al entorno.



■ **Figura 11.34**
Un transformador en un poste situado en un arcén de una carretera

Ejemplo resuelto

7 Un transformador ideal tiene 800 espiras en la bobina primaria y 60 espiras en la secundaria.
- **a** ¿Se trata de un transformador elevador o reductor?
- **b** Si se aplica un voltaje de 110 V a la bobina primaria, ¿cuál es el voltaje de salida?
- **c** Calcula la intensidad a través de un resistor de 12 Ω conectado a la bobina secundaria.
- **d** Calcula la potencia del circuito secundario.
- **e** ¿Cuál es la intensidad en la bobina primaria?

a Se trata de un transformador reductor, porque hay menos espiras en la bobina secundaria.

b $\frac{\mathcal{E}_p}{\mathcal{E}_s} = \frac{N_p}{N_s}$, por tanto $\frac{110}{\mathcal{E}_s} \times \frac{800}{60}$ y $\mathcal{E}_s = 8{,}3\,V$

c $I_s = \frac{\mathcal{E}_s}{R} = \frac{8{,}3}{12} = 0{,}69\,A$

d $P_s = \mathcal{E}_s \times I_s = 8{,}3 \times 0{,}69 = 5{,}7\,W$

e $I_p = \frac{P_p}{\mathcal{E}_p} = \frac{5{,}7}{110} = 0{,}052\,A$

Como se trata de un transformador ideal, sabemos que las potencias de entrada y de salida son iguales.

Observa que la potencia y la intensidad de entrada solo se pueden calcular si se conoce la potencia del circuito secundario. Si en el transformador ideal no hay intensidad de salida, tanto la intensidad de entrada como la potencia de entrada son nulas.

Pérdidas de potencia en transformadores

Hasta este momento hemos supuesto que los transformadores son «ideales», en otras palabras, que son 100% eficientes sin pérdidas de potencia. En la práctica, indudablemente, esto no es posible. Las principales razones por las que en un transformador parte de la potencia de entrada se disipa en forma de energía térmica son las siguientes:

- Los hilos conductores (*bobinado*) de las bobinas tienen resistencia, por tanto se genera una potencia ($P = I^2R$) cuando circula corriente a través de ellas. Esto se llama **calentamiento de Joule**.
- Tanto en el núcleo del transformador como en las bobinas se inducen corrientes. Estas corrientes inducidas (*corrientes de Foucault*), que se propagan en forma de torbellino por los conductores, provocan un calentamiento de Joule.
- Cuando el núcleo se magnetiza y desmagnetiza repetidamente también hay una transferencia de energía. Este es un ejemplo del efecto conocido como **histéresis**, en el que las propiedades del sistema se quedan rezagadas ante el efecto que produce los cambios.
- *No todo* el flujo magnético generado en la bobina primaria pasa a través de la secundaria, ya que hay una cierta «pérdida» de flujo magnético.

Para reducir las pérdidas de potencia se deben utilizar para el bobinado cables gruesos fabricados con un metal de resistividad baja (cobre). Los núcleos se suelen fabricar con capas (*láminas*) de un material ferromagnético separadas por capas delgadas de aislante para reducir lo máximo posible las corrientes de Foucault.

Los transformadores de gran tamaño son, por lo general, los más eficientes (hasta el 98% de eficiencia), e incluso con estos valores de eficiencia se deben enfriar para impedir el sobrecalentamiento. Por ejemplo, un transformador que opera con una potencia de 100 kW y una eficiencia del 95% disipa 5 000 J de energía térmica cada segundo sin que resulte peligroso. Los transformadores de menor tamaño son menos eficientes.

En la mayor parte del planeta se emplea para el suministro eléctrico corriente alterna con una frecuencia de 50 o 60 Hz. En esta elección influyen diversos factores, algunos incompatibles entre sí, entre los cuales se encuentra la eficiencia de los transformadores.

35 Enumera los factores que podrían afectar a la fem inducida de la Figura 11.33a.

36 Un transformador ideal tiene 600 espiras en la bobina primaria.
- **a** Si transforma 240 V en 12 V, ¿cuántas espiras tiene la bobina secundaria?
- **b** Cuando la bobina secundaria se conecta a una resistencia, la intensidad es 480 mA. ¿Cuál es el valor de la resistencia?
- **c** Calcula la potencia desarrollada en el circuito secundario.
- **d** ¿Qué intensidad circula por la bobina primaria?

37 **a** Dibuja un diagrama donde identifiques todos los elementos de un transformador capaz de hacer funcionar una lámpara de 10 V y 16 W a partir de una fuente de alimentación de CA de 220 V. Incluye el circuito de salida.
- **b** ¿Qué intensidad de corriente circula por el circuito primario?

38 Para elevar un voltaje de 110 V hasta 5,0 kV se necesita un transformador ideal con 36 espiras en la bobina primaria.
- **a** ¿Cuántas espiras se deben enrollar en la bobina secundaria?
- **b** Si el valor medido de la intensidad de entrada es 0,55 A, ¿cuáles son la intensidad y la potencia de salida?

39 Entre diversos valores posibles de la relación de transformación para un transformador (10:1, 100:10, 1 000:100, 10 000:1 000, etc.) se ha escogido el valor 10:1. Sugiere algunos factores a tener en cuenta a la hora de escoger el número de espiras en un transformador.

40 Un cargador de teléfono móvil transforma 110 V en 3,8 V.
- **a** Si la bobina primaria tiene 2 000 espiras, ¿cuántas debe tener la secundaria?
- **b** Si la potencia de salida del cargador es 0,58 W, ¿qué intensidad de corriente circula por la bobina secundaria?
- **c** Si la intensidad que circula por la bobina primaria es $5{,}9 \times 10^{-3}$ A, ¿cuál es la eficiencia del cargador?
- **d** ¿Qué potencia disipa el transformador?
- **e** ¿Cómo sabrías si un cargador de teléfono móvil es ineficiente?

41 Sugiere posibles motivos por los que los transformadores (y otros aparatos electromagnéticos) de gran tamaño son por lo general más eficientes que los de pequeño tamaño.

Distribución de la energía eléctrica

Las centrales eléctricas grandes suelen ser más eficientes que las pequeñas, y además es más barato construir unas pocas centrales grandes que muchas pequeñas similares. La consecuencia es que la mayoría de la gente no habita o trabaja cerca de la central eléctrica que le suministra energía eléctrica. Por tanto, la energía eléctrica a menudo se tiene que transportar a través de grandes distancias entre el lugar donde es generada y el lugar donde se utiliza. Los cables que transportan la electricidad por todo el país se denominan **líneas de transporte** (o también **líneas de alta tensión**).

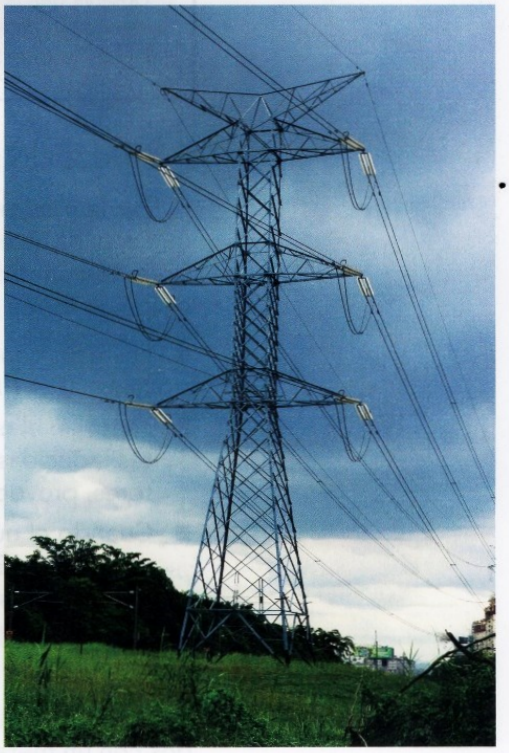


Figura 11.35
Las líneas de alta tensión transportan la energía eléctrica a través del país

Pérdidas de potencia en las líneas de transporte

En el Capítulo 5 vimos que cuando una corriente de intensidad I circula a través de un conductor de resistencia R, parte de la energía eléctrica se transforma en energía térmica. La potencia disipada, P, se puede calcular a partir de $P = I^2 R$.

Evidentemente, todos los esfuerzos se deben centrar en minimizar la pérdida de potencia en las líneas de transporte. Esto se puede conseguir manteniendo la resistencia de los cables y la intensidad que circula a través de ellos tan baja como sea posible.

El metal elegido para el conductor debe tener una resistividad baja, aunque hay que tener en cuenta también el coste económico y llegar a un equilibrio: es posible que el uso de cables más gruesos de un metal más barato acabe saliendo en global más barato que el uso de cables más finos de un metal más caro, suponiendo que ambos sean igual de buenos conductores. (Recordemos que en el Capítulo 5 vimos que $R = \rho L/A$).

Otras propiedades del metal son igualmente importantes, como la densidad, la resistencia a la tracción y la reactividad química. En general se considera que el aluminio es la mejor elección para las líneas de transporte, a menudo con un núcleo de acero para aumentar su rigidez (véase Figura 11.36).

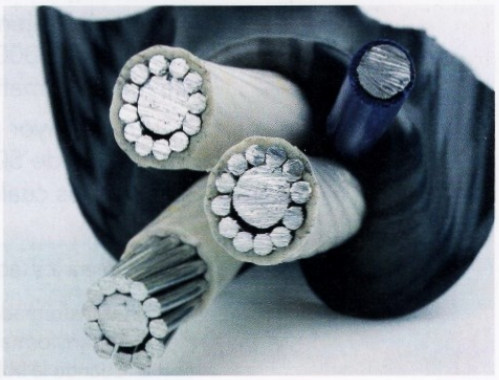


Figura 11.36
Sección transversal de una línea de alta tensión con cables internos separados

Necesidad de los transformadores para el transporte de la energía eléctrica

Para suministrar una determinada potencia eléctrica, P, a una comunidad, en teoría se puede utilizar cualquier intensidad de corriente, I, y cualquier voltaje, V, en las líneas de transporte, dado que $P = VI$. En otras palabras, si reducimos la intensidad de corriente (para reducir la disipación de energía) debemos aumentar el voltaje en la misma proporción con tal de suministrar la potencia requerida.

Los transformadores se utilizan para elevar los voltajes en las líneas de transporte tanto como sea posible, de manera que la intensidad de corriente disminuya y la energía térmica disipada (I^2R) se reduzca de manera significativa.



Figura 11.37
Transformadores elevadores en una central eléctrica

Los transformadores elevadores se ubican lo más cerca posible de las centrales eléctricas (véase Figura 11.37). Las decisiones sobre el valor máximo de los voltajes utilizados en las líneas de transporte se basan en gran parte en una combinación de factores económicos y de riesgo, sin que exista un valor ideal. El coste de las precauciones adicionales necesarias para garantizar la seguridad en el uso de voltajes extremadamente altos se debe comparar con los costes financieros y medioambientales de las pérdidas de potencia adicionales que tienen lugar cuando se transportan voltajes más bajos. En teoría, si se eleva el voltaje en un factor 1 000, por ejemplo, se puede reducir la intensidad de corriente en ese mismo factor; al mismo tiempo, la pérdida de potencia (I^2R) se reduce en un factor $1\,000^2 = 10^6$.

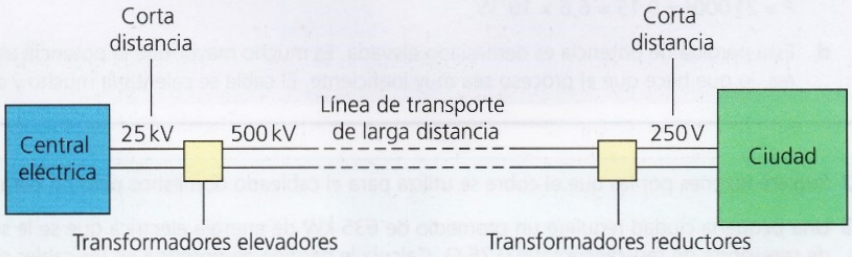
Una vez se ha transportado, el voltaje se debe reducir de nuevo hasta un valor razonablemente seguro para su uso en hogares y escuelas, por ejemplo. En la mayoría de países este voltaje está comprendido en un intervalo entre 200-250 V, aunque en las industrias se suelen utilizar voltajes más elevados. Los transformadores reductores están ubicados lo más cerca posible de los consumidores.

(Observemos que la ecuación $P = V^2/R$ se puede utilizar en las líneas de transporte para calcular la pérdida de voltaje *a lo largo* del cable. Por ejemplo, si la pérdida de potencia en un cable de resistencia 2 Ω es 10^4 W, la pérdida de voltaje a lo largo del cable es 140 V, un valor muy poco importante en comparación con los altos voltajes que se transportan).

La necesidad de transformar los voltajes explica a su vez la necesidad de utilizar corrientes alternas, ya que solo estas inducen el flujo magnético variable necesario para que funcione el transformador.

En la Figura 11.38 se muestra un diagrama de bloques que representa simplificadamente un sistema de transporte con algunos voltajes convencionales. En realidad se utiliza una serie de transformadores para elevar o reducir el voltaje, que puede llegar a alcanzar 750 kV o incluso más.

Figura 11.38
Sistema de transporte de energía eléctrica simplificado



Las líneas de transporte de las distintas zonas de un mismo país suelen estar interconectadas en lo que se conoce como **redes de transporte eléctrico**. Las redes eléctricas inteligentes, controladas por ordenador (Figura 11.39) contribuyen a equilibrar el suministro y la demanda de energía eléctrica en distintas zonas de un mismo país, e incluso a través de fronteras internacionales. La mayoría de personas se han vuelto dependientes de un suministro continuo y fiable de energía eléctrica, de manera que el mantenimiento de este suministro es prioritario para las compañías eléctricas y los gobiernos.



Figura 11.39
Centro de control de la red de transporte eléctrico de Neuenhagen (Alemania), que opera a 50 Hz

Naturaleza de la ciencia

Modelización por ordenador

Para llevar a cabo una modelización por ordenador (del transporte de la energía eléctrica, por ejemplo) se deben asumir determinadas simplificaciones, lo que nos puede conducir a no tener en cuenta todas las posibles ineficiencias y variaciones. Si la modelización del transporte eléctrico se basa en un sistema ideal, en situaciones reales obtendremos menos potencia a causa de las ineficiencias, que nunca podemos predecir al 100%. El principal cometido de los operadores del sistema es saber reconocer las limitaciones y las posibles anomalías que puede presentar cualquier sistema informático.

Ejemplo resuelto

8 **a** ¿Cuál es la intensidad total de corriente suministrada a 2 000 hogares si en cada uno se utiliza un promedio de 2,4 kW de energía eléctrica suponiendo que se suministre un voltaje de 230 V?
b Calcula la resistencia de un cable de transporte fabricado con aluminio puro ($\rho = 2{,}8 \times 10^{-8}\,\Omega$m) con un radio de 3,0 cm y una longitud de 15 km.
c ¿Cuál es la tasa de transferencia de energía eléctrica en energía térmica si la intensidad de corriente de **a** circula a través de la resistencia de **b**?
d Comenta tu respuesta al apartado **c**.

a $P = VI$

$2\,000 \times 2\,400 = 230 \times I$

$I = 21\,000\,\text{A}$

b $R = \rho L/A$

$$R = \frac{(2{,}8 \times 10^{-8}) \times (1{,}5 \times 10^{4})}{(\pi \times 0{,}030^{2})}$$

$R = 0{,}15\,\Omega$

(¡Verdaderamente no parece mucha resistencia para un cable de 15 km de longitud!)

c $P = I^2R$

$P = 21\,000^2 \times 0{,}15 = 6{,}6 \times 10^{7}\,\text{W}$

d Esta pérdida de potencia es demasiado elevada. Es mucho mayor que la potencia útil suministrada a los hogares, lo que hace que el proceso sea muy ineficiente. El cable se calentaría mucho y se fundiría.

42 Sugiere razones por las que el cobre se utiliza para el cableado doméstico pero no para las líneas de transporte.

43 Una pequeña ciudad requiere un promedio de 635 kW de energía eléctrica que se le suministra mediante una línea de transporte de resistencia total 0,76 Ω. Calcula la pérdida de potencia en los cables si el voltaje utilizado es:
a 1 000 V
b 250 000 V.

44 Sugiere por qué las industrias prefieren un suministro de energía eléctrica con un voltaje superior al doméstico.

45 Explica por qué los transformadores se deben ubicar lo más cerca posible de las centrales eléctricas y de los hogares.

46 **a** Sugiere por qué es deseable que el metal empleado en las líneas de transporte tenga una baja densidad.
b ¿Qué propiedades químicas necesita tener el metal?

47 **a** Si el bobinado primario de un transformador elevador tiene 120 espiras, ¿cuántas espiras debe tener el bobinado secundario para transformar 20,0 kV en 380 kV?
b ¿Cuál es el voltaje de salida de un transformador reductor situado al otro extremo de la línea de transporte si tiene 6 800 espiras en la bobina primaria y 80 espiras en la secundaria?
c ¿Qué supuestos has tenido en cuenta?

48 **a** Sugiere un motivo por el que un transformador podría funcionar de forma menos eficiente a altas frecuencias.
b Sugiere un motivo por el que un transformador podría funcionar de forma menos eficiente a bajas frecuencias.

49 Un transformador que forma parte de un sistema de transporte eléctrico tiene 160 espiras en la bobina primaria y 1 920 espiras en la secundaria.
a ¿Cuál es el voltaje de salida máximo teórico si el voltaje de entrada es 1 200 V?
b ¿Cuál es la potencia de entrada si circula una intensidad de 160 A por la bobina primaria?
c La eficiencia del transformador elevador es del 96%. Calcula la intensidad que circula a través de la bobina secundaria a partir de tu respuesta al apartado **a**.
d ¿Cuánta potencia se disipa en forma de energía térmica en el transformador?
e ¿Cuál es la pérdida de potencia en los cables si la línea de transporte de salida tiene una resistencia de 0,18 Ω?

Naturaleza de la ciencia



Competición y preferencia

Hemos explicado las ventajas del uso de corrientes alternas para el transporte de la energía eléctrica, que en la actualidad constituye, de lejos, el sistema más habitual empleado mundialmente. Sin embargo, durante los primeros años de generación de energía eléctrica (la década de 1880) también se consideró el uso de sistemas de corriente continua.

George Westinghouse y Thomas Edison fueron dos famosos hombres de negocios/inventores/ingenieros estadounidenses cuyas compañías escogieron dos puntos de vista opuestos sobre cuál era el mejor sistema para el transporte de la energía eléctrica. Esta dicotomía se conoce desde entonces como «**guerra de las corrientes**». Edison defendía un sistema de CC en el que hubiera muchas centrales eléctricas (más pequeñas) cercanas a los hogares, de forma que no fuera necesario utilizar altos voltajes y transformadores. (En esa época no era fácil transformar la CC). La totalidad del sistema estaba preparada para operar aproximadamente al mismo voltaje, aunque cabía esperar una pequeña caída entre el suministro y el usuario. Se pensaba que un sistema de CC sería menos peligroso por el hecho de no necesitar el uso de altos voltajes.

Por los motivos que ya hemos explicado en este capítulo, los sistemas de CA propuestos por Westinghouse han acabado siendo los usados en la práctica en todo el mundo. No obstante, aunque estos sistemas de CA han predominado desde entonces, siempre han existido algunos sistemas de CC en funcionamiento en diversos países del mundo, especialmente en superficies pequeñas con una alta densidad de población.

Los sistemas de transporte eléctrico con CA pueden dar problemas cuando se conectan distintos sistemas entre sí (por ejemplo, entre países que operan a distintas frecuencias). También se producen pérdidas significativas de energía cuando se usa CA para transportar energía bajo el agua. Por estos motivos, cada vez se está haciendo más popular el *transporte con corriente continua de alto voltaje* (*HVDC*, por sus siglas en inglés), aunque el proceso de conversión de voltajes en el caso de CC es mucho más complejo y caro que en el caso de CA.

Perspectivas adicionales

¿Suponen los campos electromagnéticos generados alrededor de las líneas de alta tensión y en nuestros hogares un riesgo para la salud?

Absorción de la energía electromagnética por el cuerpo humano

Cualquier corriente oscilante en un circuito cualquiera genera campos eléctricos y magnéticos variables que se propagan por todo el conductor. Los teléfonos móviles, las conexiones inalámbricas, los televisores y las radios, por ejemplo, se benefician de este efecto mediante circuitos y antenas diseñados para transmitir y recibir de forma eficiente campos electromagnéticos oscilantes de alta frecuencia (la frecuencia convencional de un teléfono móvil es 900 MHz).

Los cuerpos humanos (y animales) son conductores de la electricidad. Por tanto, si un campo electromagnético variable cualquiera generado en un circuito por el que circula corriente alterna pasa a nuestro cuerpo, es razonable esperar, desde el punto de vista científico, que se induzcan electromagnéticamente corrientes de muy baja intensidad, al estilo de las corrientes de Foucault inducidas en un trozo de metal, como ocurre en el núcleo de un transformador.

Algunos de los equipos electrónicos que tenemos en nuestros hogares (por ejemplo, ordenadores) comportan el uso de altas frecuencias, pero la mayoría de los electrodomésticos utilizan

solo la frecuencia de la red eléctrica, de 50 o 60 Hz, y la radiación electromagnética procedente de estos aparatos se cataloga como de *frecuencia extremadamente baja* (*ELF*, por sus siglas en inglés). Como los campos electromagnéticos oscilantes de la red eléctrica son ELF, la tasa de variación del flujo magnético es relativamente pequeña y las corrientes inducidas tienden a ser también de muy poca intensidad. La longitud de onda correspondiente es muy larga (se puede confirmar utilizando $c = f\lambda$) y esto significa a su vez que en realidad los circuitos de frecuencia baja propagan relativamente poca energía electromagnética.

Posibles riesgos para la salud



Se ha investigado mucho a nivel mundial sobre los efectos de una radiación de frecuencia extremadamente baja (ELF) sobre el cuerpo humano. La mayoría de los científicos piensa que sus efectos son insignificantes y que no existen pruebas de ningún efecto significativo sobre la salud, como un daño al material genético. Habitualmente, la intensidad de los campos magnéticos procedentes de los electrodomésticos que puede experimentar una persona es mucho menor que la intensidad del campo magnético terrestre.

Sin embargo, es comprensible que la gente se preocupe por los riesgos que pueda comportar para la salud el hecho de estar cerca de una línea de transporte eléctrico. Entre estas preocupaciones se encuentran la aparición de leucemia (especialmente en niños), otros cánceres, depresión y enfermedad cardíaca. No obstante, actualmente no se dispone de pruebas concluyentes de la existencia de una relación entre estas enfermedades y el hecho de habitar cerca de una línea de alta tensión.

Sin duda es posible que, a pesar de la actual falta de pruebas definitivas, *sí* exista un riesgo para la salud asociado al hecho de habitar cerca de una línea de alta tensión (que pudiera ser confirmado mediante la investigación científica en un futuro). Sin embargo, el hecho de que los exhaustivos estudios realizados a lo largo de años no hayan conseguido todavía determinar ninguna conexión significativa sugiere que, si existiera este riesgo desconocido, no sería, en todo caso, motivo de alarma.

Aun con la falta de pruebas convincentes, todavía hay un gran número de personas que siguen creyendo que existe un riesgo real para la salud, principalmente a causa de los reportajes que leen en Internet o en periódicos o que ven por televisión. Estos reportajes tienden a exagerar la más mínima posibilidad de riesgo para elaborar una historia que interese a la audiencia, o bien niegan la réplica a las opiniones científicas contrarias. Indudablemente, una vez instaurada en la mente la posibilidad de la existencia de un riesgo, muchos creen que lo más sensato es tomar precauciones, aunque este riesgo sea muy pequeño e incluso insignificante. Sin embargo, toda actividad humana, ya sea como individuos o como sociedad, lleva asociados riesgos y antes de preocuparnos en exceso por una actividad determinada sería conveniente comparar este posible riesgo con los de otras actividades, como cruzar la calle, viajar en avión, fumar o ingerir mucha comida basura.

La investigación sobre los posibles efectos de las diminutas corrientes inducidas sobre el cuerpo humano sigue en marcha. Si estos efectos existieran, sería razonable asumir que serían más pronunciados en presencia de corrientes de intensidad elevada, frecuencia elevada y con un mayor tiempo de exposición al campo. Sin embargo, hasta la fecha, se desconoce la existencia de procesos biofísicos en el cuerpo humano que pudieran hacer suponer a los científicos que la exposición a los campos electromagnéticos de radiación ELF pudiera afectar al material genético (ADN) o ser dañina para la salud por cualquier otro motivo.

Si consideramos que la energía electromagnética se transfiere mediante fotones, debemos tener en cuenta que se cree que la cantidad de energía que transportan es demasiado pequeña como para ocasionar reacciones dañinas. Podemos hacer comentarios similares sobre la radiación electromagnética de los teléfonos móviles.

1 **a** Calcula la longitud de onda de una radiación electromagnética de frecuencia 50 Hz.

b Sugiere un motivo por el que las longitudes de onda de este tamaño no se propagan de forma eficiente desde los electrodomésticos (véase capítulo 4).

2 **a** ¿Qué cantidad de energía transporta un único protón de frecuencia 50 Hz?

b Sugiere un motivo por el que se podría considerar improbable que una radiación de esta frecuencia afecte al cuerpo humano, con independencia de la intensidad o la duración de la radiación.

c En los dos apartados anteriores se utilizan dos teorías distintas y opuestas sobre la radiación electromagnética que están relacionadas mediante el concepto de frecuencia. ¿Qué nombre recibe esta dualidad?

3 Visita la página web de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para averiguar cuál es su opinión sobre los efectos de:

   a habitar cerca de fuentes de radiación de frecuencia extremadamente baja (ELF)

   b utilizar teléfonos móviles durante un largo periodo de tiempo.

4 Explica por qué sería razonable asumir que si existieran riesgos asociados a la exposición a la radiación ELF, serían más pronunciados con corrientes de intensidad elevada, frecuencia elevada o con una mayor exposición a la radiación electromagnética.

Enlace con la teoría del conocimiento

Naturaleza de la evidencia estadística

El posible efecto de las ondas electromagnéticas sobre la salud de los seres humanos, en particular los niños, es objeto continuo de debate. ¿Es justificable la utilización de los avances científicos incluso si desconocemos cuáles pueden ser sus consecuencias a largo plazo?

Las «consecuencias a largo plazo» pueden resultar muy difíciles de evaluar. Supongamos, a modo de ejemplo, que tras un exhaustivo estudio se ha reflejado en un informe sobre líneas de transporte eléctrico que los niños de edades comprendidas entre 5 y 15 años que han habitado durante más de cinco años a menos de 200 m de un cable aéreo de alta tensión tienen, en promedio, una probabilidad de sufrir un determinado tipo de cáncer un 10% superior a la media. Una información de este calibre sería, comprensiblemente, un gran motivo de alarma para otras personas que experimentan situaciones similares y objeto de una gran difusión, con titulares del tipo «se confirma el riesgo de cáncer». Puede que los científicos y estadísticos que han llevado a cabo el estudio hayan intentado dejar muy claro que no se debería llegar a la conclusión de que las líneas de transporte representan finalmente un riesgo para la salud, pero, indudablemente, este comentario habría recibido menor atención mediática.

La recogida de datos científicos de este tipo es, por su propia naturaleza, selectiva. Los investigadores deben escoger qué información buscar y no es fácil ser completamente imparcial, especialmente si buscamos una determinada conexión desde el comienzo. Podemos haber pasado por alto otra información igualmente relevante, o quizá los mismos datos se podrían haber interpretado de distinta manera. Por ejemplo, es posible que durante 10 años el aumento del riesgo fuera inferior al 10%, o tal vez hubo una disminución del riesgo para las personas de edad superior a 15 años, pero este tipo de información seguramente habría recibido mucha menos atención. La mayoría de científicos intentan actuar con integridad y son muy conscientes de la naturaleza confusa de la evidencia estadística. Muy pocas veces hay una intención clara de engañar.

Incluso aunque se haya establecido firmemente una conexión entre dos conjuntos de datos (es decir, exista definitivamente correlación), los científicos están muy lejos de poder demostrar que una determinada circunstancia (por ejemplo, habitar cerca de una línea de alta tensión) es la causa de otra (por ejemplo, un aumento del riesgo de sufrir cáncer). Siempre existe una incertidumbre en la exactitud de cualquier dato y los datos estadísticos de este tipo están sujetos a variaciones y limitaciones impredecibles. Así, una correlación puede ser simplemente una coincidencia, aunque la bondad del estudio y del análisis reduce esta posibilidad.

Es más, una evidencia estadística convincente puede ser engañosa. Por ejemplo, se considera un hecho confirmado que, en promedio, los niños más altos tienden a ser mejores estudiantes de física que los niños más bajos. (La explicación se encuentra al final de este apartado*).

Podría haber otras explicaciones de una posible correlación. Podría ser, por ejemplo, que las personas que habitan cerca de las líneas de alta tensión no fueran representativas (por algún motivo) de la población general, o tal vez haya algo más en el entorno de las líneas de alta tensión que hace que aumente el riesgo de cáncer, o tal vez exista un factor desconocido que también influya. Esta incerteza se traduce en que puede ser muy difícil confirmar una causa y un efecto de forma definitiva, y tanto la sociedad en general como los individuos en particular deberían emitir juicios basados solo en las evidencias disponibles. En el Capítulo 8 vimos que se ha establecido una correlación entre los niveles crecientes de dióxido de carbono y el aumento de la temperatura media planetaria, lo que lleva a la mayoría de científicos a creer que el calentamiento global está causado principalmente por gases liberados en la combustión de combustibles de origen fósil. Sin embargo, todavía hay mucha gente que duda de esta correlación.

(*Explicación: en este caso, ser más alto no es la causa de esta correlación. Crecer más y alcanzar un mejor conocimiento de la física son, ambas, consecuencias de hacerse mayor (en los niños). Es frecuente que exista una correlación entre dos factores porque ambos están causados por un tercero, que puede ser desconocido.)

Aplicaciones

¿Cables aéreos o subterráneos?

Casi todas las líneas de alta tensión y larga distancia son aéreas (suspendidas muy por encima del suelo y sujetas sobre torres metálicas por razones de seguridad) (véase Figura 11.35). Los cables en sí pueden ser puramente hilos conductores, sin aislamiento entre ellos y el aire, pero en las zonas donde se sujetan a las torres se deben utilizar muy buenos aislantes, como el vidrio o la cerámica (véase Figura 11.40).

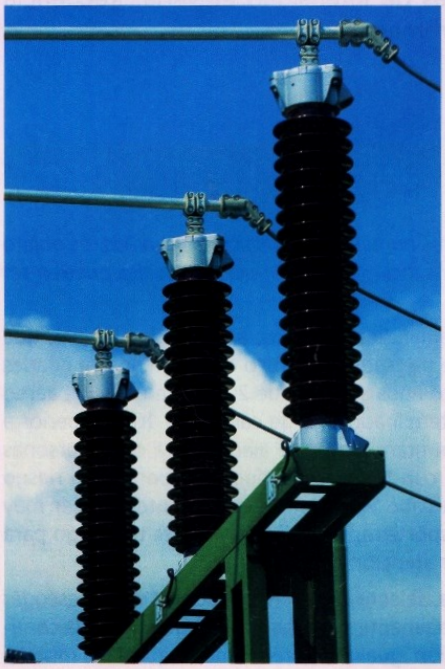


Figura 11.40
Aislamiento cerámico en una torre de alta tensión

Se considera que la intensidad del campo eléctrico de descarga disruptiva en aire seco es de unos 3000 V mm^{-1}. Este valor sugiere que se necesitaría una diferencia de potencial de 3×10^6 V para que saltara un chispazo peligroso desde un cable de una línea de alta tensión a una persona o un objeto situados a 1 m, 6×10^6 V a 2 m, y así sucesivamente. Sin embargo, estás muy equivocado si piensas que puede ser seguro estar a unos pocos metros de un cable aéreo, porque el riesgo de chispazo es impredecible, ya que depende mucho de la forma y la naturaleza del objeto cercano al cable, así como de la humedad del aire.

Muchos piensan que las torres y las líneas de transporte son antiestéticas y que estropean la belleza del paisaje, pero el coste del soterramiento de los cables es en muchas ocasiones muy superior al de los tendidos aéreos, en parte por el aislamiento adicional necesario en los cables subterráneos. Además, cuando se produce un desperfecto, la reparación de los cables subterráneos es más lenta y más cara.

Las mismas consideraciones se pueden aplicar a los cables eléctricos utilizados en pueblos y ciudades pero, en estos casos, los voltajes son más bajos y la gente está más preocupada por la seguridad y la estética del entorno, de manera que muchas comunidades prefieren pagar el coste adicional de soterrar los cables. Como alternativa, los cables se pueden tender sobre postes situados en el arcén de la vía. Puede que no sean muy estéticos, pero se pueden reparar con rapidez y facilidad, además de que se pueden añadir cables rápidamente si es necesario.



Figura 11.41
Suministro de energía eléctrica a los hogares

1 Observa la Figura 11.41. Haz una lista de las ventajas e inconvenientes de suministrar la energía eléctrica de este modo en comparación con soterrar los cables.

Rectificación de una corriente alterna

No es aconsejable utilizar corrientes alternas en los dispositivos electrónicos, como los ordenadores y los televisores. Por tanto, para este tipo de usos, la corriente alterna suministrada a un hogar se debe convertir en corriente continua. La conversión de CA a CC se denomina **rectificación** y muchos dispositivos electrónicos contienen **rectificadores**. Habitualmente, estos aparatos emplean voltajes muy inferiores a los suministrados por la red; por tanto, también se necesita un transformador para reducir el voltaje. El tipo más simple de rectificación se obtiene mediante un único *diodo*.

Un **diodo** es un componente semiconductor que permite el paso de la corriente a través de él en un solo sentido.

El símbolo de circuito para un diodo se usa en la Figura 11.42, en la que se representa un diodo conectado en serie a la salida de un transformador y un resistor regulador de carga. Observemos que el sentido convencional de circulación de la corriente a través del diodo está representado por la flecha que hay en el propio símbolo. Supondremos que la resistencia de un diodo es muy pequeña para corrientes que circulan en el sentido de la flecha (en ese momento la d.p. proporciona una **polarización directa**) y muy grande para corrientes que intentan circular en sentido contrario (**polarización inversa**).

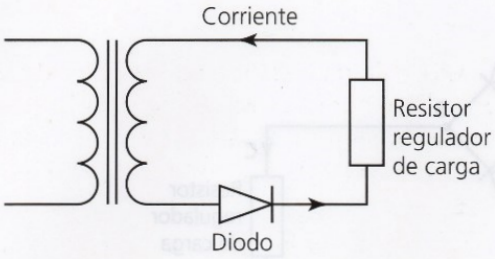


Figura 11.42 *Rectificación con un único diodo*

En la Figura 11.43 se muestra un diodo típico, pero sus diseños y tamaños varían considerablemente según el uso que se les vaya a dar.

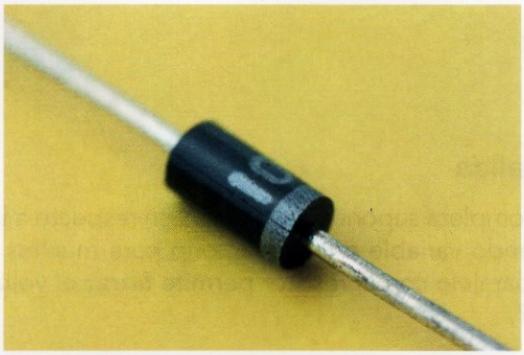


Figura 11.43 *Un diodo semiconductor típico (el sentido convencional de la corriente es hacia fuera del extremo marcado)*

En la pantalla de un osciloscopio conectado en los bornes del resistor regulador de carga podemos observar formas de onda de voltaje como las de la Figura 11.44. (Las formas de onda de intensidad de corriente serán proporcionales al voltaje para resistencias óhmicas).

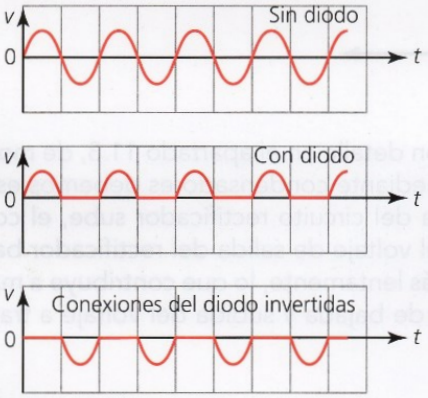


Figura 11.44 *Formas de onda de voltaje en el caso de rectificación simple*

Rectificación de media onda y rectificación de onda completa

Las dos formas de onda inferiores de la Figura 11.44 representan una rectificación, ¡pero el voltaje varía continuamente y es nulo durante la mitad del tiempo! Este tipo de rectificación se denomina **rectificación de media onda**. Para describir este tipo de salida se podría utilizar un valor numérico eficaz para el voltaje y podría ser suficiente para el funcionamiento de aparatos simples de iluminación y calefacción, aunque esta rectificación limitada es inaceptable para otros muchos propósitos. Se puede obtener fácilmente una rectificación de onda completa con un **circuito en puente** con *cuatro* diodos.

Puentes de diodos

En la Figura 11.45 se representa un circuito de *rectificación de onda completa*. Si la salida del transformador en un momento dado hace que el punto A sea positivo (en comparación con F), la corriente circulará siguiendo la trayectoria ABCDEF. Al cabo de un breve intervalo de tiempo, la salida del transformador hará que el punto F sea positivo, aunque la corriente todavía circule a través del resistor regulador de carga en el mismo sentido. En la Figura 11.46 se representa la variación que se observaría en el voltaje (proporcional a la intensidad de corriente) si se conectara un osciloscopio en los bornes del resistor regulador de carga óhmico.

Figura 11.45
Cuatro diodos conectados en un circuito en puente

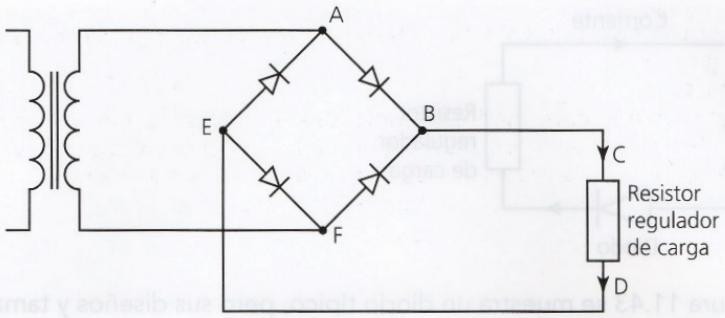
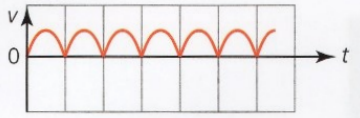


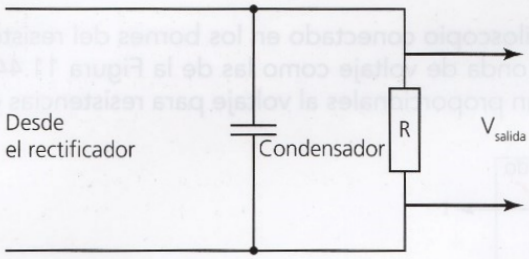
Figura 11.46
Rectificación de onda completa (la forma de onda se puede invertir)



Filtrado del voltaje de salida

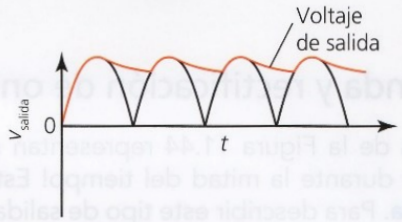
La rectificación de onda completa supone una mejora con respecto a la de media onda, aunque el voltaje de salida sigue siendo variable e insatisfactorio para muchos usos. La conexión de un condensador apropiado en paralelo con el resistor permite **filtrar** el voltaje de salida, tal como se representa en la Figura 11.47.

Figura 11.47
Filtrado del voltaje de salida mediante un condensador



Los condensadores se explican con detalle en el apartado 11.3, de modo que para comprender bien el funcionamiento del filtrado mediante condensadores debemos esperar hasta entonces. En resumen: cuando el voltaje de salida del circuito rectificador sube, el condensador *se carga* y el voltaje a través de él baja. Cuando el voltaje de salida del rectificador baja, el voltaje a través del condensador cargado baja mucho más lentamente, lo que contribuye a mantener el voltaje a través de *R* (véase la Figura 11.48). La tasa de bajada y subida del voltaje a través del condensador depende de los valores de *C* y de *R*.

Figura 11.48
Filtrado de una rectificación de onda completa mediante un condensador



50 Esboza una gráfica característica completa V-I para representar el comportamiento de un diodo ideal, incluyendo la polarización directa e inversa.

51 Utiliza las letras de la Figura 11.45 para indicar la circulación de corriente cuando el voltaje del punto F es positivo (comparado con el de A).

52 **a** Dibuja un circuito que permita obtener un voltaje de salida bajo, filtrado y con una rectificación de media onda a partir del voltaje de entrada suministrado por un transformador de la red.
b Elabora un esquema de la variación temporal del voltaje de salida.

53 En la Figura 11.49 se muestra una fuente de alimentación de bajo voltaje y con fines múltiples, como las que se utilizan habitualmente en los experimentos científicos escolares. El voltaje de salida es «escalonado» en lugar de variable continuamente y tiene una rectificación de media onda, pero no está filtrado.
a ¿Cuál es el principal componente eléctrico de esta fuente de alimentación?
b Sugiere cómo se podrían obtener distintos voltajes de salida.
c ¿A qué salida se debería conectar un calentador eléctrico, a la marcada como CC o a la marcada como CA?

d Sugiere otros experimentos para los que esta fuente de alimentación pueda resultar:
i adecuada
ii inadecuada.
e La fuente de alimentación dispone de una pantalla digital para el voltaje de salida. ¿Por qué es improbable que la pantalla indique 12 V cuando en el conmutador se seleccionan 12 V y se ha conectado un calentador eléctrico a la salida?
f La fuente de alimentación se apaga automáticamente cuando la intensidad de la corriente es demasiado elevada. Sugiere cómo podría llegar a ocurrir (la conexión se puede «reiniciar»).



Figura 11.49

Perspectivas adicionales

Otros circuitos en puente

Existen otros *circuitos en puente* con los que se pueden realizar interesantes estudios, pero no están incluidos en el programa IB. El circuito de rectificación de onda completa que acabamos de estudiar es un circuito en puente característico. Un circuito en puente está formado por dos pares de componentes conectados en paralelo (por ejemplo, diodos, en el caso del puente de rectificación) y una fuente de alimentación. Se denominan *circuitos «en puente»* porque se conecta otro componente entre los otros cuatro, como en el ejemplo que presentamos a continuación y que se representa en la Figura 11.50. Se trata de un circuito importante desde el punto de vista histórico y que se utiliza para medir una resistencia desconocida, R_x. Su importancia radica en el hecho de que no circula corriente a través del galvanómetro cuando se realiza la medida final. Este circuito se denomina *puente de Wheatstone* y el circuito similar que contiene condensadores se denomina *puente de Wien*.

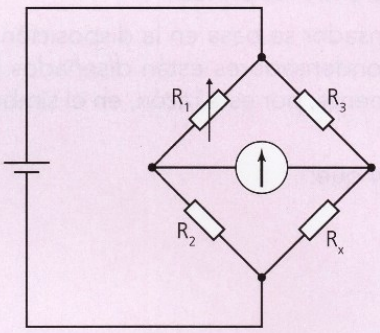


Figura 11.50
Puente de Wheatstone

11.3 Capacidad

Los condensadores se pueden utilizar para almacenar energía eléctrica para su uso posterior

El término eléctrico **capacidad** describe la facultad que tiene un objeto para «almacenar» carga eléctrica. Un **condensador** es un componente eléctrico diseñado para almacenar energía potencial eléctrica mediante la separación de cargas.

El tipo más simple de condensador es el formado por dos placas metálicas paralelas separadas por un material aislante.

Condensador de placas paralelas

Consideremos la Figura 11.51. Cuando el conmutador se conecta en la posición A, los electrones son atraídos hacia el borne positivo de la batería y repelidos por el borne negativo, de modo que una de las placas queda cargada positivamente mientras que la otra queda cargada negativa-

mente con la misma carga (tal como se representa en la Figura). A este proceso se le denomina **cargar** el condensador. La adición o sustracción de más electrones se hace cada vez más difícil a medida que la carga acumulada sobre cada placa aumenta, porque las placas cargadas se oponen al desplazamiento de los electrones. Se alcanza una carga constante cuando la diferencia de potencial entre las placas debida a las cargas equivale a la diferencia de potencial entre bornes de la batería. El condensador se puede **descargar** conectando el conmutador en la posición B, de modo que se invierta el sentido de circulación de los electrones. En esta disposición experimental simple, la carga y la descarga son procesos *muy* rápidos porque no hay resistencia en el circuito. Observemos que la carga nunca circula a través del aislante entre las placas (a menos que se produzca un fallo, llamado «*descarga disruptiva*»).

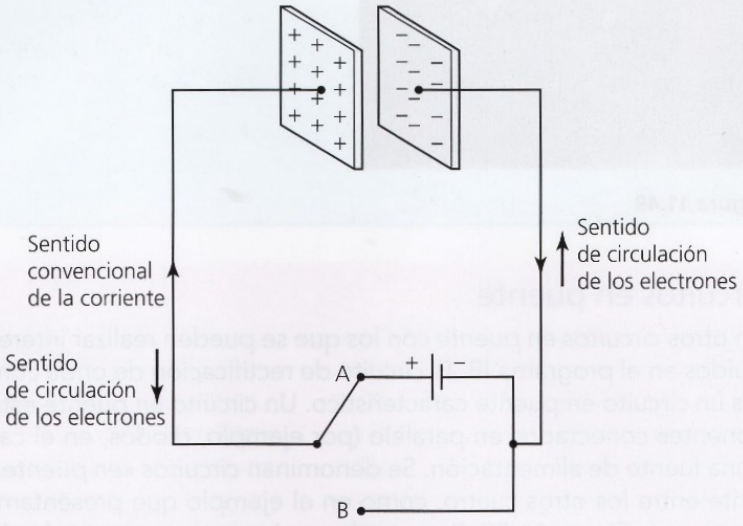


Figura 11.51
Dos placas metálicas paralelas conectadas a una batería

La cantidad de carga, q, sobre este tipo de placas es muy pequeña (habitualmente picoculombios). Sin embargo, mediante una fuente de alimentación y un culombímetro sensible se puede estudiar la dependencia de esta carga respecto al valor de la diferencia de potencial a través de las placas, V, o respecto a su área, A, o respecto a su separación, d. También se puede estudiar el efecto de la variación del tipo de aislante entre las placas.

El símbolo de circuito para un condensador se basa en la disposición en forma de placas paralelas (véase la Figura 11.52). (Algunos condensadores están diseñados para ser electrolíticos, de manera que se deben conectar correctamente; por esta razón, en el símbolo de estos condensadores se incluye un signo +).



Figura 11.52
Símbolo de circuito para un condensador

Los resultados experimentales indican que:

$$q \propto V$$

$$q \propto A$$

$$q \propto \frac{1}{d}$$

También se puede comprobar que $q \propto$ *permitividad eléctrica*, ε, del aislante entre las placas.

La **permitividad eléctrica** se introdujo en el Capítulo 5 como una constante que representa las propiedades eléctricas de un aislante. La permitividad relativa, $\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0$, donde ε_0 es la permitividad del vacío. En resumen:

$$q = \varepsilon \frac{VA}{d}$$

Esta ecuación *no* figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Si el aislante entre las placas es aire o el vacío, podemos escribir:

$$q = \varepsilon_0 \frac{VA}{d}$$

Esta ecuación *no* figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Capacidad

La capacidad, C, de una disposición de placas paralelas se define de la manera siguiente:

$$C = \frac{\text{carga acumulada sobre las placas}}{\text{diferencia de potencial entre las placas}} = \frac{q}{V}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física.*

La unidad para la capacidad se denomina **faradio**, F (1 F = 1 C/1V) y representa una capacidad grande, de modo que habitualmente se utilizan unidades más pequeñas como el milifaradio (mF), el microfaradio (μF), el nanofaradio (nF) y el picofaradio (pF). Observemos que la magnitud de la carga, q, es la misma en *ambas* placas, porque la carga se ha desplazado de una placa a la otra.

(No debemos confundir el símbolo en cursiva C para la capacidad con el símbolo C para el culombio).

Comparando $C = \frac{q}{V}$ con $q = \frac{\varepsilon VA}{d}$ obtenemos:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física.*

Si el material entre las placas es aire o el vacío podemos utilizar $C = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$.

Materiales dieléctricos

Podemos aumentar la capacidad de un condensador introduciendo entre sus placas un material aislante con las propiedades eléctricas adecuadas. Estos materiales contienen moléculas polares y se denominan **dieléctricos** (o **materiales dieléctricos**). Los dieléctricos son aislantes cuyas moléculas se pueden polarizar en un campo eléctrico (véase la Figura 11.53).

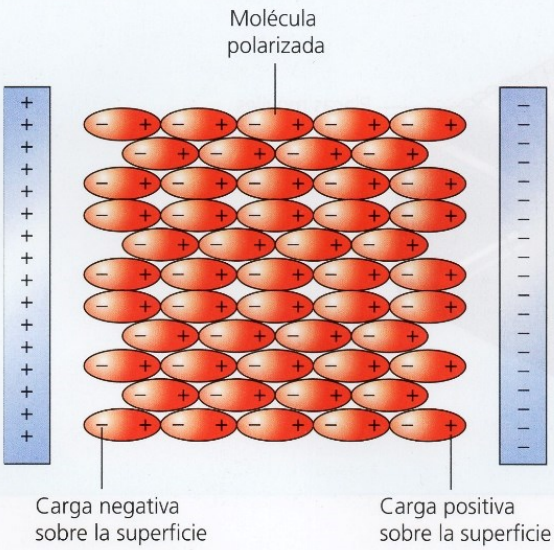


Figura 11.53
Moléculas polarizadas en un dieléctrico entre dos placas cargadas

El efecto global de un dieléctrico es aumentar la cantidad de carga acumulada sobre las placas de un condensador (para una diferencia de potencial dada). Las moléculas polarizadas crean su propio campo eléctrico que se opone al campo eléctrico entre las placas, de modo que el campo neto entre estas tiende a reducirse a causa del dieléctrico. Sin embargo, para que el condensador se mantenga a la diferencia de potencial suministrada por la fuente, V, se debe acumular más carga, q, en las placas. Como $C = q/V$, la capacidad, C, aumenta.

A la permitividad relativa se la denomina también **constante dieléctrica**.

Ejemplo resuelto

9 **a** Calcula la capacidad de dos placas metálicas paralelas con un área de 15 cm^2 cada una y separadas por 2,0 mm de aire.

b ¿Qué carga se acumula sobre cada una de las placas cuando se conecta una diferencia de potencial de 12 V entre ambas?

a $C = \varepsilon_0 A/d = (8{,}85 \times 10^{-12}) \times (1{,}5 \times 10^{-3})/(2{,}0 \times 10^{-3}) = 6{,}6 \times 10^{-12}$ F (o 6,6 pF)

b $C = q/V$

$6{,}6 \times 10^{-12} = q/12$

$q = 8{,}0 \times 10^{-11}$ C (o 80 pC)

54 En las especificaciones de un condensador convencional utilizado en circuitos electrónicos figuran los valores 470 µF, 15 V. ¿Cuál es la carga acumulada en este condensador si se conecta a una fuente de alimentación de 12 V?

55 Calcula la d.p. necesaria para que se acumule una carga de 1,00 nC sobre cada una de las placas paralelas de un condensador, sabiendo que cada una tiene un área de 47,6 cm^2 y que la separación entre las placas es de 2,46 mm en aire.

56 Determina la capacidad de dos placas paralelas de área 4,9 cm^2 cuando se coloca entre ambas una capa de polietileno de 0,18 mm de espesor, sabiendo que su permitividad relativa es 2,25.

57 Cuando se aplica una d.p. de 1 550 V a través de dos placas paralelas con una capa de aislante entre ambas, se acumula una carga de 3,7 µC en cada una de las placas. Sabiendo que el espesor de aislante es de 0,074 mm y que el área de las placas es 15,8 cm^2, determina la permitividad del aislante.

58 Investiga cuáles son los mejores materiales dieléctricos para aumentar la capacidad de un condensador.

59 Se utiliza una capa de óxido de aluminio de $2{,}3 \times 10^{-7}$ m de espesor para fabricar un condensador. Si las placas de un condensador de 1,0 µF tienen un área de 24 cm^2, ¿cuál es la constante dieléctrica del óxido de aluminio?

60 La circulación de carga por un circuito se compara a veces con la circulación de agua por las tuberías impulsada por la acción de una bomba. Sugiere de qué modo se puede establecer una analogía entre un tapón de goma elástica utilizado para bloquear la circulación de agua a través de una tubería, y el efecto de conectar un condensador en un circuito.

61 En la Figura 11.54 se representa un condensador variable. Sugiere cuál es el motivo por el que varía la capacidad cuando giramos la manivela.

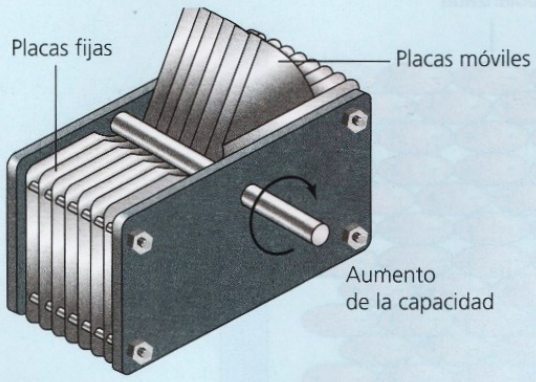


Figura 11.54

Aplicaciones prácticas de los condensadores

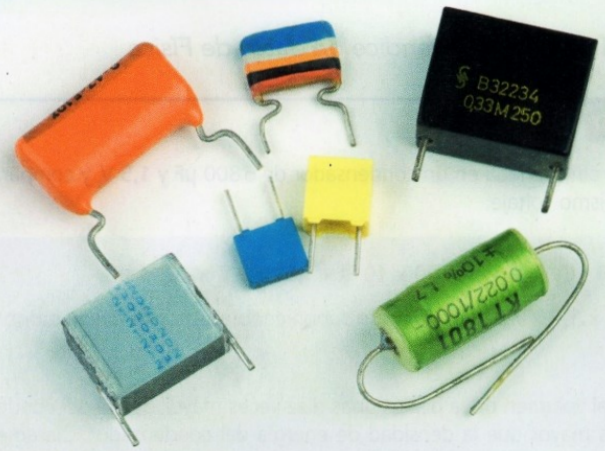
Los condensadores tienen numerosas aplicaciones prácticas, entre las que se encuentran:

- filtrado de voltajes (tal como se explicó en el apartado 11.2)
- almacenamiento de cantidades relativamente pequeñas de energía, seguido a menudo de una rápida liberación
- circuitos de sintonización (por ejemplo en radios)
- circuitos de temporización

- filtrado de la corriente continua en un circuito de CA
- mantenimiento del voltaje en el caso de una interrupción del suministro de corriente eléctrica (por ejemplo, para los ordenadores portátiles).

Existen muchos diseños comerciales de condensadores (véase la Figura 11.55), pero la posibilidad de almacenar más carga para un voltaje dado solo se puede conseguir mediante un mayor tamaño (recordemos que $C = \varepsilon_0 A/d$). El diseño de condensadores de gran capacidad requiere que las capas de dieléctrico sean muy finas (lo que produce en ocasiones descargas disruptivas), por tanto, hacen falta maneras imaginativas de aumentar el área de las placas. La manera más frecuente de conseguirlo es enrollando placas muy finas y material dieléctrico en forma cilíndrica.

Figura 11.55
Un surtido de condensadores



62 Explica por qué las resistencias de valor elevado pueden tener un tamaño pequeño, y en cambio los condensadores con mucha capacidad deben tener un tamaño grande.

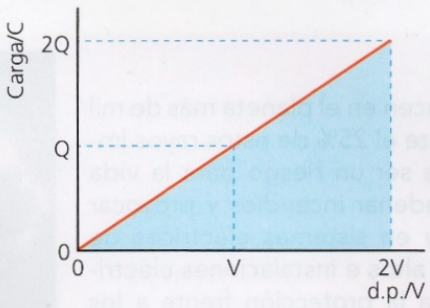
63 Sugiere por qué se utiliza un condensador como fuente de energía para el flash de una cámara.

64 ¿Qué problemas pueden surgir en un condensador que contiene una capa muy fina de dieléctrico?

Energía almacenada en un condensador cargado

Como hemos visto, la carga acumulada en un condensador es proporcional a la d.p. entre sus bornes. Esta relación se representa en la gráfica de la Figura 11.56. La pendiente de esta gráfica es igual a la capacidad, $C = \Delta q/\Delta V$.

Figura 11.56
Relación carga-voltaje para un condensador



Para desplazar los electrones hacia las placas o desde estas se debe realizar un trabajo, porque hay que vencer las fuerzas de las cargas que ya están sobre las placas. Sabemos que, en general, el trabajo realizado = d.p. × carga (a partir de la definición de d.p.), pero ni la d.p. ni la carga son constantes. Como la d.p. y la carga son proporcionales entre sí, podemos utilizar la relación siguiente:

$$\begin{pmatrix}\text{energía transferida}\\ \text{a un condensador}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\text{d.p. media}\\ \text{(entre 0 y } V\text{)}\end{pmatrix} \times \begin{pmatrix}\text{carga del condensador}\\ \text{cuando la d.p. es } V\end{pmatrix}$$

$$E = \frac{1}{2}V \times q$$

pero observemos también que:

La energía almacenada en un condensador equivale al área bajo la gráfica *q*-*V*.

Observemos que, si duplicamos *V*, *q* también se duplica, de manera que la energía almacenada es $\times 2^2$. Podemos verlo más claramente en la ecuación siguiente, que se obtiene a partir de $C = q/V$.

$$E = \frac{1}{2}CV^2$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Ejemplo resuelto

10 Calcula la energía almacenada en un condensador de 6800 μF y 1,5 V, y compárala con la energía almacenada en una pila AA del mismo voltaje.

Condensador: $E = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2} \times (6800 \times 10^{-6}) \times 1{,}5^2 = 7{,}7 \times 10^{-3}$ J

Pila: $E = VIt = 1{,}5 \times 1{,}0 \times 7200$ (estimación suponiendo que la pila pueda proporcionar 1,0 A durante 2 horas)

$E \approx 10^4$ J

Suponiendo que el volumen de la pila es unas diez veces mayor que el del condensador, su densidad de energía es unas 10^5 veces mayor que la densidad de energía del condensador. Claramente, los condensadores no son adecuados para almacenar grandes cantidades de energía. No obstante, pueden liberar la energía almacenada rápidamente (a diferencia de las pilas, que tienen una resistencia interna importante y llevan asociados procesos químicos que consumen tiempo).

El «flash» utilizado en una cámara o en un teléfono móvil requiere una d.p. de unos pocos cientos de voltios (por tanto la cámara debe incluir un pequeño «transformador») y la luz emitida debe tener una intensidad elevada. Esto significa que la energía eléctrica y la intensidad suministradas deben ser relativamente elevadas. Un condensador puede proporcionar esta energía porque la duración del flash es corta, de modo que la energía global no es demasiado grande. Cargar un condensador de una cámara solo requiere unos pocos segundos porque la corriente circula por una resistencia en el circuito. Los condensadores que se cargan mediante voltajes elevados pueden ser peligrosos por las elevadas intensidades de corriente iniciales que pueden suministrar.

La energía almacenada en un condensador de gran tamaño se puede utilizar para iluminar una pequeña bombilla o accionar un motor durante un breve periodo de tiempo. Si se dispone de un juliómetro se puede medir directamente la energía que sale del condensador.

Perspectivas adicionales

Rayos y truenos

Se estima que cada año se producen en el planeta más de mil millones de rayos y aproximadamente el 25% de estos rayos impactan contra el suelo. Además de ser un riesgo para la vida humana, los rayos pueden desencadenar incendios y provocar daños considerables en edificios y en sistemas eléctricos de todo tipo. En el diseño de edificios altos e instalaciones eléctricas importantes se tiene en cuenta la protección frente a los efectos de los rayos.



Figura 11.57
Resplandor provocado por un rayo

Los rayos, como los que se representan en la Figura 11.57, caen desde una nube al suelo (o a otra nube) cuando la intensidad del campo eléctrico entre ambos es lo suficientemente grande como para que el aire se convierta en conductor. El conjunto formado por la nube cargada y el terreno que hay debajo se puede considerar un condensador de gran tamaño. El aire que hay entre ambos actúa como un material dieléctrico, pero cuando la d.p. es demasiado elevada tienen lugar una descarga disruptiva y una conducción que producen un efecto espectacular.

Las nubes contienen gotas de agua y partículas de hielo de diversos tamaños que se mueven continuamente por todas partes y colisionan entre sí. Durante este proceso, se puede transferir carga (electrones) entre las partículas. El resultado es una separación de cargas a gran escala en la que la parte superior de la nube se carga positivamente y la parte inferior negativamente, como se representa en la Figura 11.58. Se trata de una simplificación de lo que ocurre en la realidad porque los detalles exactos todavía no se conocen completamente.

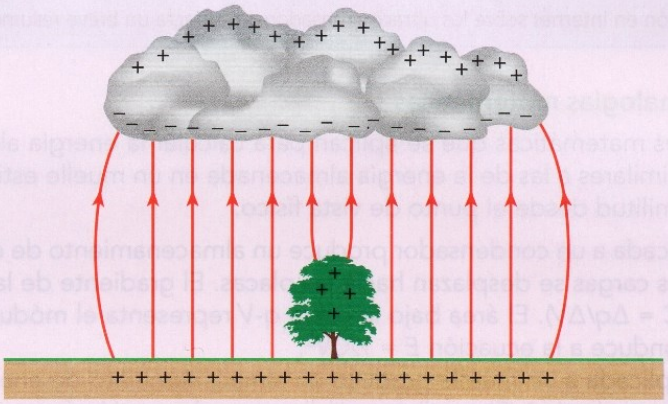


Figura 11.58
Campo eléctrico bajo una nube

La gran cantidad de carga negativa de la parte inferior de la nube repele los electrones de la superficie terrestre y de los objetos situados sobre esta, que se cargan positivamente, generándose en consecuencia un campo eléctrico muy intenso entre el suelo y la parte inferior de la nube. Cuando la separación entre las cargas y el campo resultante son lo bastante grandes, se crea un camino conductor y el rayo cae por el camino que presenta una menor resistencia. Se trata de un proceso complejo, en el que circula carga tanto desde el suelo como desde la nube. La intensidad de corriente es muy elevada y, por tanto, se trata de un proceso en el que se ve envuelta mucha energía, gran parte de la cual se transfiere en forma de radiación (incluida la luminosa) y energía interna. El calentamiento extremadamente rápido del aire, de miles de grados, provoca una rápida expansión y grandes variaciones de presión cuyo resultado es la emisión de sonido (el trueno).

Los campos eléctricos son más intensos cerca de objetos puntiagudos, por tanto cualquier cosa que «sobresalga» en los alrededores en general tiene un riesgo mayor de que le caiga un rayo. Sin embargo, el campo eléctrico en el interior de una superficie conductora es siempre nulo, así, las personas que están en el interior de un coche o de una casa, por ejemplo, están a salvo de sufrir la caída directa de un rayo.

Además de los campos eléctricos intensos generados por las nubes cargadas, sobre la superficie terrestre actúa también un campo eléctrico permanente, aunque débil, de unos 150 N C^{-1}, dirigido hacia el centro de la Tierra. Su origen está en una serie de capas de partículas cargadas positivamente que rodean el planeta (la ionosfera) y que son consecuencia de la acción de la radiación solar.

1 ¿Qué recomendaciones de seguridad le darías a una persona que está en el exterior en caso de tormenta con rayos y truenos?

2 Investiga sobre los daños que puede sufrir un edificio como consecuencia de la caída de un rayo. ¿Cómo se pueden evitar?

3 Busca historias de gente que haya sobrevivido a la caída de un rayo.

4 Averigua qué zonas del planeta sufren un mayor número anual de caídas de rayos.

65 ¿Cuánta energía se puede almacenar en dos placas paralelas de área 130 cm^2 y separadas por 1,5 mm de aire, cuando se conecta una d.p. de 24 V entre sus bornes?

66 **a** ¿Qué voltaje hay que aplicar entre los bornes de un condensador de 0,15 F para almacenar 100 J de energía?
b ¿Qué problemas se pueden producir si se conecta un voltaje de 40 V entre los bornes del condensador cuando el voltaje recomendado es 10 V como máximo?

67 El condensador utilizado en una cámara tiene una capacidad de 100 μF y suministra energía al flash a una d.p. de 280 V durante un tiempo de 0,0017 s. Determina:
a la energía total almacenada en el condensador
b la potencia del flash (suponiendo que es constante durante todo el destello y que se utiliza toda la energía del condensador).

68 Esboza una gráfica *q*-*V* para un condensador de 470 μF y 20 V.

69 Determina la cantidad de energía almacenada en un condensador de 2,7 mF sabiendo que acumula una carga de $5{,}9 \times 10^{-3}$ C.

70 Busca información en Internet sobre los ultracondensadores y redacta un breve resumen de lo que has averiguado.

Naturaleza de la ciencia

Relaciones y analogías matemáticas

Las relaciones matemáticas que se aplican para calcular la energía almacenada en un condensador son muy similares a las de la energía almacenada en un muelle estirado (Capítulo 2), aunque no exista una similitud desde el punto de vista físico.

- Una d.p. aplicada a un condensador produce un almacenamiento de energía potencial eléctrica cuando las cargas se desplazan hacia las placas. El gradiente de la curva *q*-*V* representa la capacidad ($C = \Delta q/\Delta V$). El área bajo la curva *q*-*V* representa el módulo de la energía almacenada, que conduce a la ecuación $E = \frac{1}{2}CV^2$.
- Una fuerza aplicada a un muelle produce un almacenamiento de energía potencial cuando el muelle se elonga (estira). El gradiente de la curva elongación-fuerza (*x*-*F*) representa 1/constante de fuerza ($k = \Delta F/\Delta x$). El área bajo una curva *x*-*F* representa la magnitud de la energía almacenada, que conduce a la ecuación $E = \frac{1}{2}kx^2$.

Existen muchas otras analogías matemáticas en física y pronto encontraremos otra en este mismo capítulo: las relaciones matemáticas que incluyen cambios exponenciales tienen muchas aplicaciones, entre las que se encuentran la teoría de condensadores y la radioactividad.

Condensadores en serie y en paralelo

Es posible que en algún momento necesitemos calcular la capacidad total de dos o más condensadores conectados en un circuito. Por ejemplo, puede que queramos saber cómo conectar condensadores de valores estándar para conseguir una capacidad total determinada.

Condensadores en paralelo

Consideremos tres (o más) condensadores conectados en paralelo, como los de la Figura 11.59. El condensador individual, $C_{paralelo}$, que tiene una capacidad equivalente a la capacidad combinada de los demás, acumula una carga total sobre sus placas equivalente a $q_1 + q_2 + q_3$. Es decir:

$q_{paralelo} = q_1 + q_2 + q_3$, pero $q = VC$, por tanto:

$VC_{paralelo} = VC_1 + VC_2 + VC_3$

Dividiendo entre *V*, que es el mismo para todos:

$$C_{paralelo} = C_1 + C_2 + C_3 \ldots$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

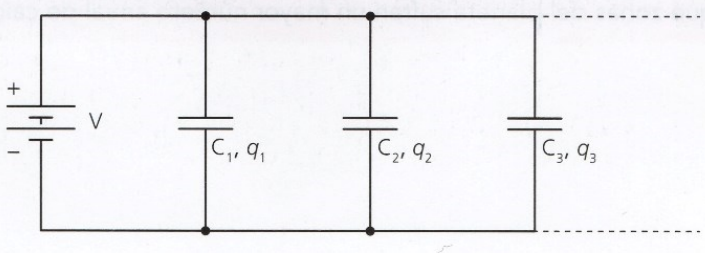


Figura 11.59 *Condensadores conectados en paralelo*

Condensadores en serie

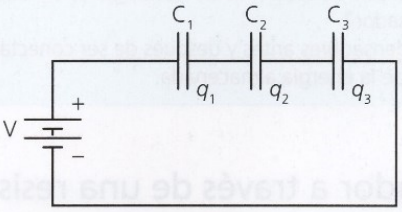


Figura 11.60
Condensadores conectados en serie

En la Figura 11.60 se representan tres condensadores conectados en serie. Sabemos que cada condensador acumula la misma cantidad de carga, q, y que $V = V_1 + V_2 + V_3$, pero $V = q/C$, de manera que la capacidad de un condensador individual, C_{serie}, equivalente a la capacidad combinada de los demás condensadores se puede determinar a partir de:

$$\frac{q}{C_{serie}} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3}$$

Eliminando q obtenemos:

$$\frac{1}{C_{serie}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \ldots$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Se puede determinar la capacidad de un condensador (o combinación de condensadores) descargado conectándolo en paralelo con otro condensador de capacidad conocida, como se muestra en el Ejemplo resuelto 11.

De forma alternativa, se puede determinar una capacidad desconocida a partir de la tasa de decrecimiento temporal de la intensidad de corriente de descarga (o de la d.p. a través del condensador). Explicaremos este método en profundidad a continuación.

Ejemplo resuelto

11 Se carga un condensador de 0,10 F conectándolo a una fuente de alimentación de 5,9 V. Cuando se desconecta de la fuente y a continuación se conecta en paralelo con otro condensador descargado de capacidad desconocida, el voltaje a través de ellos cae hasta 0,71 V.

a Calcula la carga acumulada en el primer condensador antes de conectar el segundo.

b Determina la capacidad combinada de los dos condensadores en paralelo.

c ¿Cuál es el valor de la capacidad desconocida?

a $Q = CV = 0{,}10 \times 5{,}9 = 0{,}59\,C$

b $C = Q/V = 0{,}59/0{,}71 = 0{,}83\,F$

c $C_{paralelo} = C_1 + C_2$

$0{,}83 = 0{,}1 + C_2$

$C_2 = 0{,}73\,F$

71 Calcula la capacidad combinada de tres condensadores de capacidades 1 000 μF, 2 000 μF y 3 000 μF conectados en:

a paralelo

b serie.

72 Si solo dispusieras de condensadores de 470 μF, sugiere cómo podrías combinar cuatro de ellos para obtener una capacidad total de 285 μF con un margen de error del 1%.

73 Dos condensadores de 680 μF se conectan en paralelo, y esta combinación se conecta en serie a un tercer condensador con la misma capacidad que los dos primeros. ¿Cuál es la capacidad combinada de los tres condensadores?

74 Un condensador de 470 μF se carga completamente conectándolo a una fuente de alimentación de 15,1 V. Cuando se retira de la fuente y se conecta en paralelo con un condensador descargado, el voltaje cae hasta 11,7 V.
a ¿Qué capacidad tiene el segundo condensador?
b Calcula la energía almacenada en los condensadores antes y después de ser conectados.
c Explica la diferencia entre ambos valores de la energía almacenada.

Descarga de un condensador a través de una resistencia

La tasa a la que se descarga (o carga) un condensador depende de la magnitud de la resistencia del circuito. (Hasta ahora hemos supuesto que no hay resistencia, de forma que la carga y la descarga son procesos muy rápidos). Como explicaremos a continuación, la magnitud de la intensidad de corriente de descarga y la tasa a la que se descarga el condensador se pueden controlar fácilmente y esta es una de las razones de la importancia de los condensadores como componentes de un circuito. Tanto las intensidades de corriente como los voltajes asociados a los condensadores varían temporalmente, de forma que los condensadores son componentes fundamentales de los circuitos que tienen salidas con variación temporal, como los temporizadores y los generadores de señal.

Circuito resistor-condensador (RC) en serie

Observemos el circuito representado en la Figura 11.61. El condensador se carga muy rápidamente conectando el conmutador en la posición A porque no hay ningún resistor conectado. Cuando el conmutador está en la posición B, el condensador se descarga a una tasa muy inferior que depende de los valores de C y de R. Si la tasa de descarga no es excesivamente rápida, se puede medir la intensidad de corriente a intervalos regulares para poder dibujar una gráfica (véase la Figura 11.62, a modo de ejemplo). Como alternativa se puede conectar un osciloscopio en los bornes de la resistencia y en la pantalla se puede visualizar la variación temporal de V_R (proporcional a la intensidad de corriente).

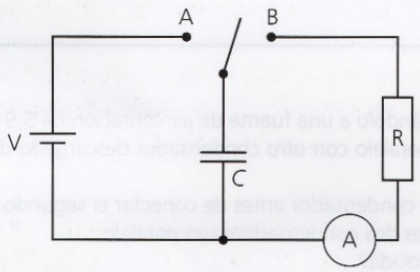


Figura 11.61
Circuito para estudiar la intensidad de la corriente de descarga de un condensador

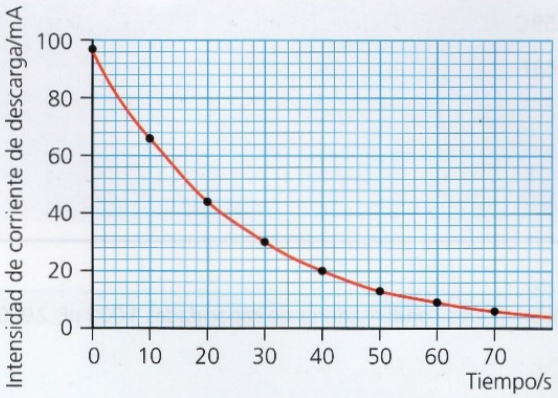


Figura 11.62
Variación temporal característica de la intensidad de corriente de descarga de un condensador

La intensidad de corriente cae muy rápidamente al principio, pero después su tasa de variación (que se puede determinar a partir del gradiente instantáneo de la curva) se hace cada vez menor. La razón de este comportamiento es que a medida que la carga remanente en el condensador disminuye, las fuerzas sobre los electrones disminuyen a su vez proporcionalmente.

Este tipo de variación, en la que la tasa de decrecimiento de una magnitud es proporcional a la cantidad remanente, se denomina **variación exponencial** (en este caso es un decrecimiento o «decaimiento» exponencial).

Una de las consecuencias de una variación exponencial es que el cociente entre las cantidades correspondientes al principio y al final de un intervalo de tiempo dado es siempre el mismo. Este valor del cociente se puede utilizar para comprobar rápidamente los datos y verificar si se trata o no de una relación exponencial.

A partir de la Figura 11.62 vemos que las sucesivas intensidades de corriente (mA) cada diez segundos toman los valores 97, 66, 44, 30, 20, ... Si se trata de una relación exponencial: 97/66 = 66/44 = 44/30 = 30/20... Estos cocientes son aproximadamente iguales (1,5) y por tanto se confirma que se trata de un decrecimiento exponencial.

Las gráficas que representan la variación temporal tanto de la carga como de la d.p. ($V = q/C$) del condensador tienen la misma forma exponencial de la Figura 11.62.

Cualquier decrecimiento exponencial se puede representar mediante ecuaciones del tipo:

$$x = x_0 e^{-kt}$$

donde:

x_0 es el valor al inicio de un periodo de tiempo de duración t

x es el valor al final del periodo de tiempo de duración t

e es un número que aparece de forma natural en procesos en los que se producen variaciones exponenciales; su valor es 2,718

k es la constante que caracteriza el decrecimiento exponencial específico considerado. Valores mayores de k significan variaciones más rápidas.

Constante de tiempo

En teoría, una cantidad que decrece exponencialmente con el tiempo nunca alcanza el valor cero. Esto significa que es imposible determinar el tiempo que tarda un condensador en descargarse completamente. En lugar de ello, determinamos la duración del periodo de tiempo necesario para que la cantidad disminuya hasta una determinada fracción (o porcentaje) de su valor al inicio de este mismo periodo. Por ejemplo, podemos escoger caracterizar un decrecimiento exponencial concreto diciendo que siempre se tardan 17 s para que la cantidad disminuya hasta la mitad de su valor. El concepto de *semivida* se introdujo en el Capítulo 7 para caracterizar la tasa de una desintegración radiactiva, que también tiene carácter exponencial. El concepto de semivida, en cambio, no se suele utilizar para describir circuitos con condensadores.

Por razones de conveniencia matemática, el tiempo escogido para caracterizar el decrecimiento exponencial de una cantidad es el tiempo que tarda en caer hasta 1/e (= 1/2,718), o aproximadamente el 37%, de su valor inicial. (No es necesario que sepas explicarlo). Este tiempo se denomina **constante de tiempo**, τ, de un decrecimiento exponencial.

La constante de tiempo para el decrecimiento representado en la Figura 11.62 es aproximadamente 26 s.

Como ya hemos mencionado, la tasa a la que un condensador se descarga depende de la capacidad, C, y de la resistencia, R, del circuito. Se puede demostrar que:

constante de tiempo, $\tau = RC$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

La unidad para la constante de tiempo es el segundo (s).

El significado de la constante de tiempo puede visualizarse en las gráficas carga-tiempo de las Figuras 11.63 y 11.64. Las gráficas *I*-*t* o *V*-*t* mostrarían las mismas características.

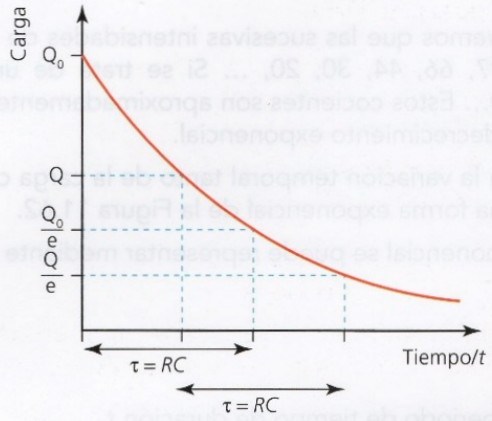


Figura 11.63
Gráfica de descarga de un condensador en la que se visualiza el significado de la constante de tiempo

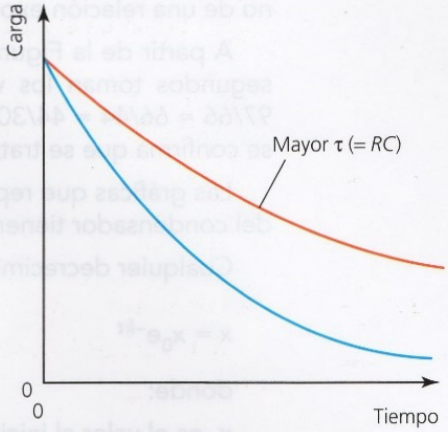


Figura 11.64
Cómo afectan los distintos valores de la constante de tiempo a la descarga

La determinación de la constante de tiempo, a partir de la gráfica de descarga de un condensador a través de un resistor de resistencia conocida, permite calcular el valor de una capacidad desconocida.

Ejemplo resuelto

12 La intensidad de corriente al inicio de la descarga de un condensador (como en la Figura 11.63) es 45,6 mA. Sabiendo que su capacidad es 470 μF y que se descarga a través de un resistor de 2,0 kΩ:
- **a** ¿Cuál es su constante de tiempo?
- **b** ¿Cuál será la intensidad de corriente al cabo de:
  - **i** una constante de tiempo
  - **ii** dos constantes de tiempo?
- **c** ¿Cuál era el voltaje inicial a través del resistor (y el condensador)?

a $\tau = RC = (470 \times 10^{-6}) \times (2{,}0 \times 10^{3}) = 0{,}94\,\text{s}$

b ¿Cuál será la intensidad de corriente al cabo de:
- **i** $0{,}37 \times 45{,}6 = 17\,\text{mA}$
- **ii** $0{,}37^2 \times 45{,}6 = 6{,}2\,\text{mA}$

c $V = IR = (45{,}6 \times 10^{-3}) \times (2{,}0 \times 10^{3}) = 91\,\text{V}$

75 El voltaje a través de un condensador que se está descargando cae de 10 V a 3,7 V en un periodo de 76 s. Si la resistencia del circuito es $2{,}8 \times 10^3\ \Omega$, ¿cuál es la capacidad del condensador?

76 La carga acumulada en un condensador cae de $4{,}2 \times 10^{-5}$ C hasta $2{,}8 \times 10^{-5}$ C en 10 s cuando se descarga a través de un resistor de 68 kΩ.
- **a** Esboza una gráfica carga-tiempo para la descarga en el transcurso de 40 s.
- **b** Utiliza la gráfica para estimar el valor de la capacidad del condensador.

77 La intensidad de descarga de un condensador de 470 μF a través de una resistencia desconocida cae desde 87 mA hasta 12 mA en dos minutos exactamente. Estima el valor de la resistencia desconocida.

78 Demuestra que la unidad para la constante de tiempo en el SI es el segundo (s).

79 **a** Utiliza la Figura 11.62 para determinar la tasa de variación temporal de la intensidad de corriente para los valores del tiempo: 10 s, 30 s, 50 s y 70 s.
b Comprueba si los cocientes entre tasas sucesivas son constantes, lo cual supondría otra confirmación más del carácter exponencial de la gráfica.

80 Un profesor desea utilizar un condensador de 0,05 F y un amperímetro de 0–10 mA para hacer una demostración de la descarga de un condensador en un tiempo máximo de 5 minutos. Sugiere valores convenientes del voltaje de carga y de la resistencia.

81 Sugiere un motivo por el que el término semivida se considera apropiado para desintegraciones radiactivas pero no para descargas de condensadores.

Ecuaciones para la descarga de un condensador

Las ecuaciones que describen el decrecimiento exponencial de la carga acumulada en un condensador y la corriente de descarga, y la d.p. a través de un condensador son las siguientes. Todas ellas figuran en el *Apéndice de datos de Física*.

$$q = q_0 e^{-t/\tau}$$
$$I = I_0 e^{-t/\tau}$$
$$V = V_0 e^{-t/\tau}$$

Estas ecuaciones nos permiten calcular el valor de una magnitud en *cualquier instante de tiempo* conociendo un valor anterior y la constante de tiempo (RC).

Si tomamos logaritmos naturales en la ecuación, para la intensidad de corriente obtenemos la siguiente ecuación (que *no* figura en el *Apéndice de datos de Física*).

$$\ln I = \ln I_0 - \frac{t}{\tau}$$

(O bien $\ln I_0/I = t/\tau$. De manera similar, $\ln Q_0/Q = t/\tau$ y $\ln V_0/V = t/\tau$.)

La gráfica de $\ln I$ (o $\ln Q$ o $\ln V$) con respecto a t tiene el aspecto de la gráfica representada en la Figura 11.65.

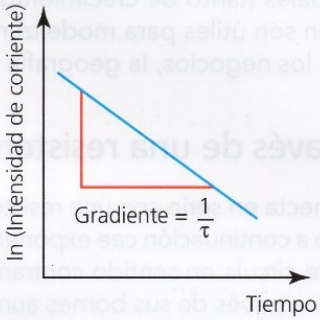


Figura 11.65 *Gráfica del logaritmo natural de la intensidad de corriente con respecto al tiempo*

Si comparamos la ecuación de la curva, $\ln I = -t/\tau + \ln I_0$, con la ecuación general de una recta ($y = mx + c$), vemos que el valor del gradiente de la curva es igual a $1/\tau$. Se trata de la forma más exacta de determinar la constante de tiempo a partir de los resultados de un experimento en el que se estudia la intensidad de corriente de descarga o el voltaje (véase la pregunta 8).

Ejemplos resueltos

13 El voltaje a través de un condensador de 2 000 μF de capacidad es 12,4 V cuando empieza a descargarse a través de una resistencia de 3 250 Ω. ¿Qué tiempo transcurrirá hasta que el voltaje haya caído exactamente 1 V?

$$\tau = RC = (2\,000 \times 10^{-6}) \times 3\,250 = 6{,}500$$
$$V = V_0 e^{-t/\tau}$$
$$1{,}00 = 12{,}4e^{-t/6{,}500}$$
$$\ln\left(\frac{12{,}4}{1{,}00}\right) = \frac{t}{6{,}500}$$
$$t = 16{,}4\,\text{s}$$

14 En un experimento para determinar la capacidad de un condensador se observa que la corriente de descarga cae hasta un 10% de un valor previo en un intervalo de tiempo de 39 s. Si la descarga tiene lugar a través de un resistor de resistencia 57,6 kΩ, ¿cuál es el valor de la capacidad desconocida?

$$I = I_0 e^{-t/\tau}$$
$$0{,}1I_0 = I_0 e^{-39/(57{,}6 \times 10^3)C}$$
$$\ln 10 = \frac{39}{57{,}6 \times 10^3}\,C$$
$$C = 2{,}9 \times 10^{-4}\,\text{F}$$

82 El voltaje a través de un condensador que se está descargando se mide cada 10 segundos durante 1 minuto. Los valores registrados son: 9,7; 8,5; 7,5; 6,6; 5,8; 5,1 y 4,5.
- **a** Representa gráficamente el logaritmo natural del voltaje respecto al tiempo.
- **b** Utiliza la gráfica anterior para determinar el valor de la constante de tiempo.
- **c** Confirma el resultado obtenido mediante cálculos a partir de los datos de partida.
- **d** ¿Por qué se suele considerar que es mejor el método gráfico?
- **e** Sabiendo que la resistencia del circuito es 1,0 kΩ, ¿cuál es su capacidad?

83 Cuando se descarga un condensador de 0,01 F a través de un resistor de 10 kΩ, ¿qué porcentaje de la carga original de $5{,}7 \times 10^{-3}$ C permanece acumulada en las placas al cabo de 54 s?

84 Se observa que la d.p. a través de un condensador de 1 000 μF cae hasta 2,3 V en un intervalo de 80 s. Si la resistencia del circuito es 0,1 MΩ, ¿cuál es el valor inicial de la d.p.?

85 Cuando un condensador de 680 μF se descarga a través de una resistencia de magnitud desconocida, la intensidad de corriente cae desde 3,3 mA hasta 1,9 mA en 30 s. Determina el valor de la resistencia.

Naturaleza de la ciencia

Las variaciones exponenciales son frecuentes

Las matemáticas asociadas a las variaciones exponenciales se utilizan en dos temas principales del núcleo del Nivel superior de este curso (la descarga de un condensador y la desintegración radiactiva), pero se pueden aplicar en otros muchos ámbitos. Por ejemplo, se puede considerar que la tasa de enfriamiento de un objeto caliente (como una taza de café) es proporcional a la diferencia de temperatura con respecto a su entorno, y se puede estudiar esta relación comprobando si la temperatura disminuye de forma (aproximadamente) exponencial con el tiempo. Es poco probable que la relación sea perfectamente exponencial porque el modelo matemático no es más que una representación simplificada de la realidad.

Se pueden encontrar relaciones exponenciales (tanto de crecimiento como de decrecimiento) en muchas otras ramas de la ciencia, y también son útiles para modelizar procesos correspondientes a numerosas áreas de conocimiento como los negocios, la geografía y la economía.

Carga de un condensador a través de una resistencia

Cuando un condensador descargado se conecta en serie con una resistencia y una d.p., la intensidad de corriente comienza siendo elevada, pero a continuación cae exponencialmente, por las mismas razones que en la descarga (aunque la corriente circula en sentido contrario en ambos procesos). La carga acumulada en el condensador y el voltaje a través de sus bornes aumentan hasta el límite marcado por la tasa de descarga, tal como se representa en la Figura 11.66, en la que se comparan las gráficas de carga y de descarga.

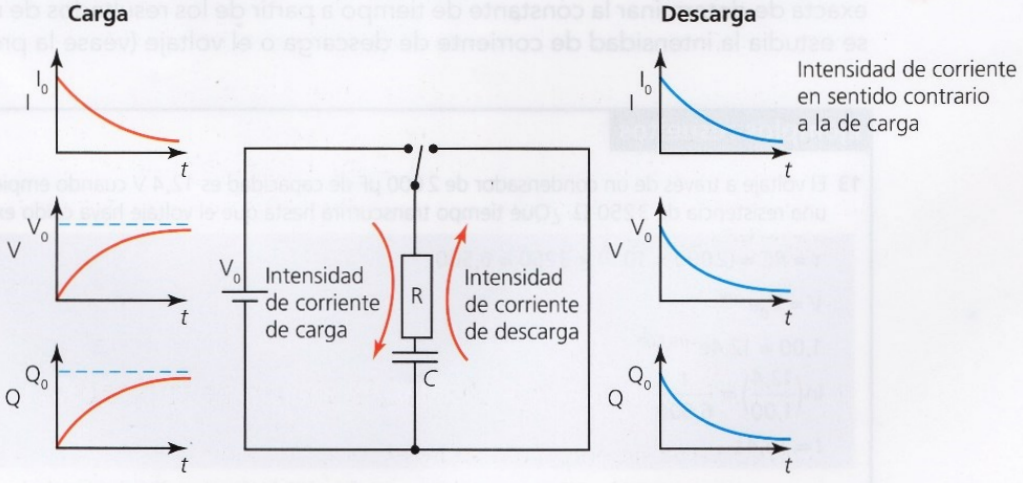


Figura 11.66 *Circuitos y gráficas de los procesos de carga y descarga*

La tasa del proceso de carga viene representada por la misma constante de tiempo ($\tau = RC$) del proceso de descarga.

- Al cabo de una constante de tiempo, V y Q aumentan hasta $(1 - 0{,}37) = 0{,}63$ (o 63%) de sus valores máximos.
- Al cabo de dos constantes de tiempo, V y Q aumentan hasta $(1 - 0{,}37^2) = 0{,}86$ (o 86%) de sus valores máximos.
- Al cabo de tres constantes de tiempo, V y Q aumentan hasta $(1 - 0{,}37^3) = 0{,}95$ (o 95%) de sus valores máximos.

86 Un condensador de 100 μF se carga a través de un resistor de 100 kΩ y una batería con una diferencia de potencial entre bornes de 1,5 V. Determina:
- **a** la d.p.
- **b** la carga acumulada en el condensador al cabo de 20 s.
- **c** ¿Cuál es la intensidad de corriente a través del resistor en ese momento?

87 Esboza una gráfica carga-tiempo (para 60 s) para un condensador de 50 mF que se carga a través de un resistor de 1 200 Ω y una batería de 12 V.

88 Esboza una gráfica intensidad de corriente-tiempo (para 10 s) para un condensador que se carga a través de un resistor de 8,2 kΩ y una batería de 6 V.

Perspectivas adicionales

Medida de la capacidad con un conmutador de lámina

En este experimento se utiliza un *conmutador de lámina* electromagnético controlado por una corriente alterna de alta frecuencia para cargar y descargar repetidamente un condensador (véase la Figura 11.67). Como la frecuencia es elevada, el microamperímetro indica una intensidad de corriente constante y la carga total que circula por segundo es igual a la intensidad de corriente. El cociente entre la intensidad de corriente y la frecuencia nos proporciona la carga media que sale del condensador en cada descarga, y la capacidad se puede determinar a partir de $C = q/V$. Suponemos que el condensador se descarga (casi) completamente en cada ciclo.

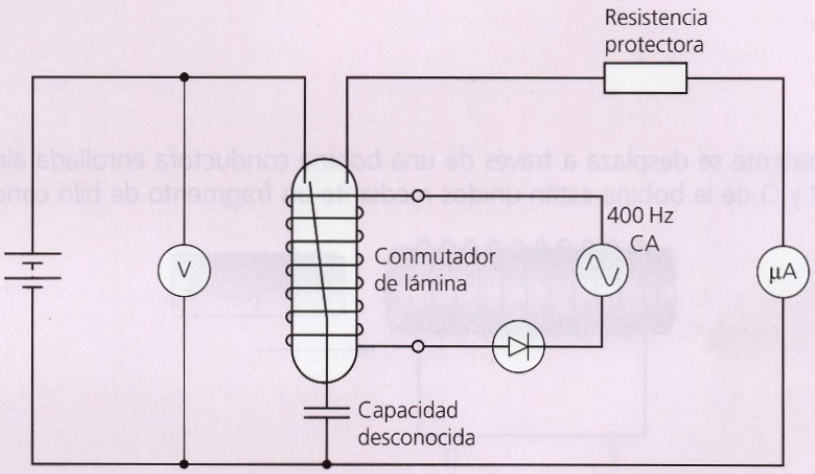


Figura 11.67 *Utilización de un conmutador de lámina para medir la capacidad*

Las preguntas siguientes se refieren a la Figura 11.67.

1 Sugiere por qué se necesita un diodo en el circuito.

2 Con una batería de 3,1 V y una frecuencia de 400 Hz para controlar el conmutador de lámina se mide una intensidad de 480 μA. Determina el valor de la capacidad.

3 Explica por qué es necesaria una resistencia protectora y argumenta si su valor debería ser grande o pequeño.

Filtrado del voltaje de salida de un rectificador

Ahora que ya sabemos más sobre el comportamiento de los condensadores, podemos repasar el efecto de un condensador como filtro del voltaje de salida de un rectificador. Observemos de nuevo las Figuras 11.47 y 11.48. Cuando el voltaje que sale del rectificador es mayor que el voltaje a través del condensador, este último se carga. Cuando el voltaje que sale del rectificador cae rápidamente por debajo del voltaje a través del condensador, este último mantiene el voltaje a través de la resistencia reguladora de carga y se descarga.

La constante de tiempo (RC) del circuito se debe comparar a la frecuencia de la fuente de alimentación. En el caso de rectificación de onda completa de un voltaje de red de frecuencia 50 Hz se producen máximos sucesivos cada 0,01 s. Un condensador de filtrado convencional puede tener una capacidad de unos 10 000 μF. Para una resistencia reguladora de carga, la constante de tiempo sería de 1 s, de manera que la caída de voltaje en 0,01 s sería mínima.

Selección de preguntas de examen

Hoja 1 Preguntas del IB y preguntas tipo IB

1 Las pérdidas de potencia en las líneas de transporte eléctrico se pueden reducir mediante el uso de transformadores elevadores y/o reductores. ¿Cuál de las opciones siguientes describe las ubicaciones correctas de los transformadores?

A. transformador elevador cerca de la central eléctrica, transformador reductor cerca de los consumidores
B. transformador elevador cerca de la central eléctrica, transformador elevador cerca de los consumidores
C. transformador reductor cerca de la central eléctrica, transformador reductor cerca de los consumidores
D. transformador reductor cerca de la central eléctrica, transformador elevador cerca de los consumidores.

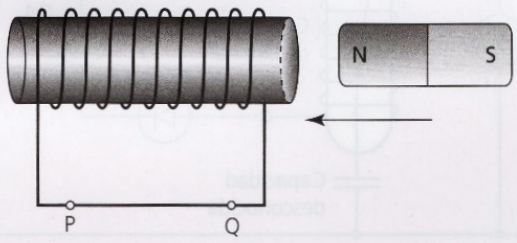
2 ¿Cuál de las opciones siguientes no representa un posible motivo para las pérdidas de potencia en un transformador?

A. corrientes de Foucault en el núcleo
B. calentamiento resistivo del bobinado
C. fricción entre la bobina y el núcleo
D. «pérdida» de flujo magnético del núcleo.

3 Un flujo magnético en aumento atraviesa un anillo metálico de área transversal A. Si el aumento del flujo magnético en un periodo t es F, la fem inducida en el anillo es:

A. F
B. $\frac{F}{t}$
C. Ft
D. FAt

4 Una barra imantada permanente se desplaza a través de una bobina conductora enrollada alrededor de un cilindro no conductor. Los extremos P y Q de la bobina están unidos mediante un fragmento de hilo conductor recto.



La corriente inducida en el fragmento de hilo conductor recto es

A. alterna
B. nula
C. desde P a Q
D. desde Q a P.

© IB Organization

5 La ecuación $\varepsilon = Blv$ describe la inducción electromagnética. ¿Cuál de las opciones siguientes no es cierta?

A. v es la velocidad de un conductor que se mueve perpendicularmente a través de un campo magnético.
B. B es el flujo magnético.
C. l es la longitud del conductor.
D. ε es la magnitud de la fem inducida.

6 Si se dice que una determinada corriente es alterna (CA), ¿cuál de las siguientes cantidades debe ser variable?

A. la frecuencia de la corriente
B. el valor máximo de la intensidad de corriente
C. el valor efectivo de la intensidad de corriente
D. el sentido de la corriente.

7 La frecuencia de rotación de la bobina de un generador de CA se duplica. El voltaje eficaz de salida (voltaje rms):

A. se mantiene constante
B. se multiplica por 2
C. se multiplica por $\sqrt{2}$
D. se divide entre $\sqrt{2}$.

8 La cantidad de carga que se puede almacenar en un condensador se puede incrementar:

A. aumentando la separación entre las placas paralelas
B. aumentando la permitividad eléctrica del medio dieléctrico entre las placas
C. disminuyendo el área de las placas
D. disminuyendo la diferencia de potencial entre las placas.

9 Para obtener una rectificación de media onda de una corriente alterna es necesario utilizar:

A. un diodo
B. un condensador
C. un transformador
D. todos los componentes anteriores.

10 ¿Cuál de las opciones siguientes es la mejor descripción del flujo magnético?

A. intensidad del campo magnético por unidad de área
B. intensidad del campo magnético por unidad de longitud del conductor
C. intensidad del campo magnético perpendicular a una superficie multiplicada por el área de esta superficie
D. intensidad del campo magnético multiplicada por el número de espiras.

11 Los altos voltajes se utilizan para el transporte de la energía eléctrica en largas distancias porque:

A. los altos voltajes se pueden reducir hasta cualquier valor requerido
B. las intensidades de corriente que se pueden utilizar son más elevadas
C. las pérdidas de potencia durante el transporte se minimizan
D. los transformadores tienen una eficiencia elevada.

© IB Organization

12 Un circuito cerrado de hilo conductor metálico encierra un área A. Se enrollan N espiras sobre el circuito y su flujo magnético aumenta desde un valor Φ hasta un valor 3Φ en 4s. La fem inducida a través del circuito es:

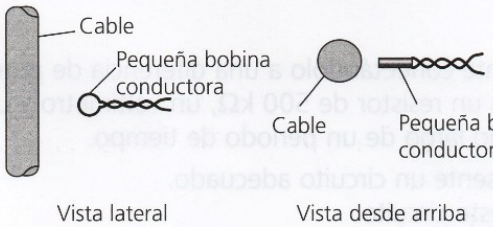
A. $N\Phi$
B. $2NA\Phi$
C. $\frac{1}{2}NA\Phi$
D. $\frac{1}{2}N\Phi$

13 Se dispone de tres condensadores similares, cada uno con una capacidad C. ¿Cuál de los valores siguientes de la capacidad no se puede alcanzar mediante la combinación de dos o tres de estos condensadores?

A. $0{,}5\,C$
B. C
C. $1{,}5\,C$
D. $2\,C$

Hoja 2 Preguntas del IB y preguntas tipo IB

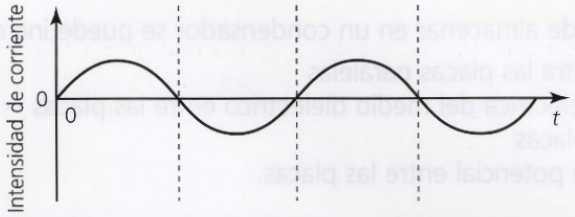
1 a Para medir el valor eficaz (valor rms) de una corriente alterna en un cable, se coloca una pequeña bobina conductora cerca de este.



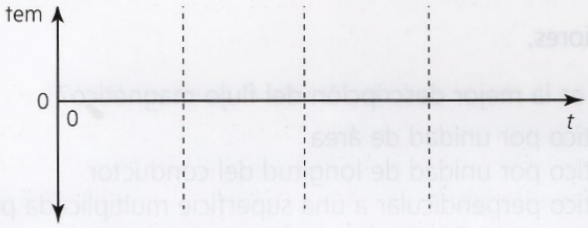
El plano de la pequeña bobina conductora es paralelo a la dirección del cable y sus extremos están conectados a un voltímetro de CA de alta resistencia.

Utiliza la ley de Faraday para explicar por qué se induce una fem en la pequeña bobina. (3)

b En la gráfica inferior se representa la variación de la intensidad de corriente en el cable con respecto al tiempo *t*.



Copia los ejes de la gráfica inferior y dibuja la variación temporal de la fem inducida en la pequeña bobina. (2)



c Explica cómo se pueden utilizar las lecturas del voltímetro de CA de alta resistencia para comparar los valores eficaces (valores rms) de la corriente alterna de diferentes cables. (3)

© IB Organization

2 Esta pregunta es sobre fuerza electromotriz inducida (fem).

a Un rodillo de material conductor se encuentra en una región donde actúa un campo magnético uniforme y se desplaza horizontalmente a lo largo de dos raíles conductores paralelos X e Y. Los raíles están conectados por uno de sus extremos mediante un hilo conductor.



La velocidad del rodillo es constante y en ángulo recto con respecto a la dirección del campo magnético uniforme.

i. Describe cómo se induce una fuerza en el rodillo haciendo referencia a las fuerzas que actúan sobre sus electrones conductores. (3)

ii. La fem inducida tiene su origen en la tasa de variación del flujo. Explica qué significado tiene la tasa de variación del flujo en esta situación concreta. (1)

b La longitud del rodillo del apartado **a** es 1,2 m y su velocidad es 6,2 m s^{-1}. La fem inducida es 15 mV.

i. Determina la magnitud de la intensidad del campo magnético a través del que se desplaza el rodillo. (2)

ii. Explica la relación de la ley de Lenz con la situación descrita en el apartado **a**. (2)

© IB Organization

3 Un condensador se carga completamente conectándolo a una diferencia de potencial de 12 V. A continuación, un alumno lo conecta a un circuito con un resistor de 500 kΩ, un voltímetro y un amperímetro para observar el comportamiento del condensador a lo largo de un periodo de tiempo.

a Dibuja un diagrama donde se represente un circuito adecuado. (2)

b Calcula la constante de tiempo de este circuito. (2)

c Esboza una gráfica voltaje-tiempo para la descarga del condensador para un periodo de tiempo total de 4 minutos. (3)

12 Física cuántica y nuclear

IDEAS FUNDAMENTALES

- El ámbito cuántico microscópico ofrece una gran variedad de fenómenos cuya interpretación y explicación requiere ideas y conceptos nuevos que no encontramos en el ámbito clásico.
- El carácter discreto de las cantidades que aparecen en el ámbito atómico continúa dándose también en el ámbito nuclear.

12.1 Interacción de la materia con la radiación

El ámbito cuántico microscópico ofrece una gran variedad de fenómenos cuya interpretación y explicación requiere ideas y conceptos nuevos que no encontramos en el ámbito clásico

En 1900 se creía que la física ya casi se comprendía en su totalidad, aunque todavía existían algunas «lagunas» de conocimiento, como la naturaleza de los átomos y de las moléculas y las formas de interacción de la radiación con la materia. Muchos físicos creían entonces que esta falta de conocimiento se solventaría sin tener que recurrir a nuevas teorías. Sin embargo, en pocos años se vio que las «pequeñas lagunas» eran en realidad temas fundamentales cuya comprensión precisaba el establecimiento de nuevas teorías radicalmente distintas. Uno de los descubrimientos importantes fue que la energía solo aparece en cantidades *discretas* (separadas) conocidas como **cuantos** (en singular **cuanto**). Las repercusiones de este descubrimiento fueron enormes y se engloban en lo que denominamos *física cuántica*.

A medida que la física cuántica se desarrollaba, hubo que abandonar algunos conceptos clásicos. Ya no había una distinción clara entre partículas y ondas, por ejemplo. El cambio fundamental fue el descubrimiento de que los sistemas cambian de maneras que no se pueden predecir con exactitud, sino únicamente en forma de probabilidad de un suceso.

Fotones

El físico alemán Max Planck fue el primero en proponer (en 1900) que la transferencia de energía de la radiación electromagnética se producía en forma de un gran número de cantidades separadas, individuales, de energía (y no en forma de ondas continuas). Estos «paquetes» discretos de energía se denominan *cuantos*, aunque se suelen denominar también **fotones**. El concepto de fotón se introdujo en el Capítulo 7 como una manera de explicar por qué los átomos emiten o absorben radiación en cantidades cuantizadas, generándose un espectro de líneas característico.

Esta importante teoría, que desarrolló en los años posteriores Albert Einstein, describe la naturaleza de la radiación electromagnética como *partículas*, en lugar de *ondas* (la «Dualidad onda-partícula» se explica en la página 516).

La energía, E, que transporta cada fotón (cuanto) depende de su frecuencia, f, y viene dada por la relación:

$$E = hf$$

h es la constante de Planck. Su valor ($6{,}63 \times 10^{-34}$ J s) y la ecuación anterior figuran en el *Apéndice de datos de Física*.

Las preguntas siguientes repasan estas ideas. A continuación consideraremos las pruebas experimentales que sustentan el modelo fotónico de la radiación electromagnética (el efecto fotoeléctrico).

1 Calcula el número de fotones que emite cada segundo un teléfono móvil que funciona a una frecuencia de 850 MHz y cuya potencia radiada es 780 mW.

2 ¿Cuál es el cociente aproximado entre la energía de un fotón de luz azul y la energía de un fotón de luz roja?

3 Un detector de luz de muy baja intensidad recibe un total de $3{,}32 \times 10^{-17}$ J de luz de longitud de onda 600 nm. Calcula el número de fotones recibidos por el detector.

4 **a** Calcula un valor aproximado para la energía de un fotón de rayos X en julios y en electronvoltios.
b Sugiere un motivo por el cual la exposición a rayos X de baja intensidad durante un breve periodo de tiempo es peligrosa, mientras que la exposición a intensidades relativamente altas de luz visible no es dañina.

Efecto fotoeléctrico

Cuando se dirige un haz de radiación electromagnética sobre una superficie metálica limpia (de determinados metales), se pueden desprender algunos electrones. A este efecto se le denomina **efecto fotoeléctrico** (Figura 12.1) y a los electrones desprendidos se les llama **fotoelectrones**. Si se dan las condiciones adecuadas, el efecto fotoeléctrico se puede producir con luz visible, rayos X y rayos gamma, pero la demostración más habitual se lleva a cabo con radiación electromagnética y cinc. En la Figura 12.2 se muestra una disposición experimental típica.

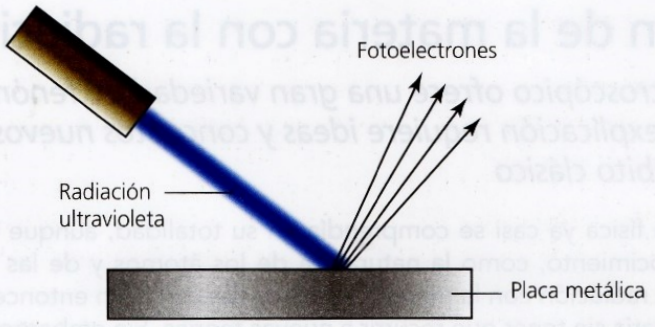


Figura 12.1
Efecto fotoeléctrico: emisión de un chorro de electrones procedentes de una superficie metálica iluminada con radiación ultravioleta

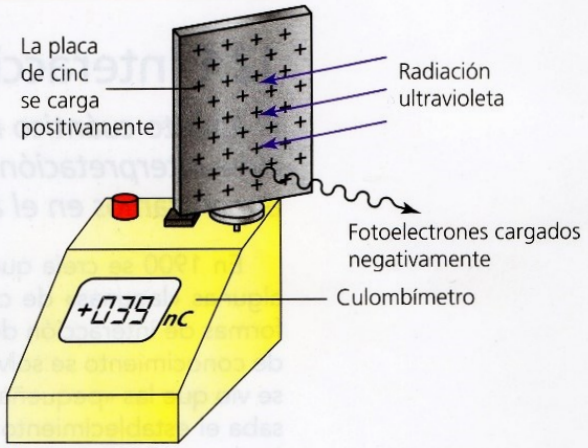


Figura 12.2
Experimento demostrativo del efecto fotoeléctrico

La radiación ultravioleta incide sobre una placa de cinc conectada a un culombímetro (que mide pequeñas cantidades de carga). La placa de cinc se carga positivamente como resultado de la incidencia de la radiación, porque algunos electrones cargados negativamente que estaban sobre la placa (previamente neutra) han adquirido la suficiente energía cinética para escapar de la superficie.

Los estudios simples del efecto fotoeléctrico indican una serie de características fundamentales.

- Si la intensidad de la radiación aumenta, la carga sobre la placa aumenta más rápidamente (porque se desprenden más fotoelectrones cada segundo).
- No hay retraso temporal entre la radiación que incide sobre la superficie metálica y la emisión de fotoelectrones. El desprendimiento de fotoelectrones de la superficie es *instantáneo*.
- El efecto fotoeléctrico solo puede tener lugar si la frecuencia de la radiación es superior a un determinado valor *mínimo*. La menor frecuencia para la que se produce una emisión se denomina **frecuencia umbral**, f_0. (De forma alternativa podríamos decir que hay una longitud de onda *máxima* por encima de la cual no tiene lugar efecto fotoeléctrico). Si la frecuencia de la radiación incidente es menor que la frecuencia umbral, el efecto no tendrá lugar *aunque aumentemos de forma significativa la intensidad de la radiación*. La frecuencia umbral para el cinc, por ejemplo, es $1{,}04 \times 10^{15}$ Hz, que se encuentra en la zona ultravioleta del espectro. La luz visible no libera fotoelectrones del cinc (o de otros muchos metales comunes).
- Para una frecuencia de incidencia determinada, el efecto fotoeléctrico tiene lugar con algunos metales únicamente, no con todos. El motivo es que los distintos metales tienen a su vez frecuencias umbral distintas.

Explicación del efecto fotoeléctrico: modelo de Einstein

Si intentáramos utilizar la teoría ondulatoria de la radiación para efectuar predicciones sobre el efecto fotoeléctrico, cabría esperar lo siguiente. (1) La radiación de *cualquier* frecuencia puede causar un efecto fotoeléctrico si la intensidad es suficientemente elevada. (2) Puede haber un retraso temporal en el inicio del efecto porque hace falta un tiempo para obtener la energía necesaria (como el calentamiento del agua hasta que se produce la ebullición).

Estas predicciones son *falsas*, de manera que se necesita una teoría alternativa. Einstein se dio cuenta de que no es posible explicar el efecto fotoeléctrico sin comprender primero la naturaleza cuántica de la radiación.

El modelo de Einstein explica el efecto fotoeléctrico mediante el concepto de fotón. Cuando un fotón de la radiación incidente interactúa con un electrón de la superficie metálica, le transfiere *toda* su energía. Debemos remarcar que *un único* fotón solo puede interactuar con *un único* elec-

trón y que esta transferencia de energía es *instantánea*: no hace falta esperar a un ascenso gradual de la energía. Si el efecto fotoeléctrico ya se está produciendo, el aumento de la intensidad de la radiación solo se traduce en el aumento del número de fotoelectrones, no de sus energías.

Einstein interpretó que parte de la energía que transporta el fotón (y que después pasa al electrón) se utiliza para vencer las fuerzas de atracción que mantienen normalmente a un electrón en el interior de la superficie metálica. La energía restante se transfiere en forma de energía cinética al (foto) electrón recientemente liberado. El principio de conservación de la energía nos permite escribir:

$$\begin{matrix}\text{energía transportada}\\ \text{por el fotón}\end{matrix} = \begin{matrix}\text{trabajo realizado para desprender}\\ \text{el electrón de la superficie}\end{matrix} + \begin{matrix}\text{energía cinética}\\ \text{del fotoelectrón}\end{matrix}$$

Pero la energía necesaria para desprender los distintos electrones *no* es siempre la misma, sino que varía según la posición que ocupa el electrón respecto a la superficie. Así, por ejemplo, se requiere una menor energía para desprender los electrones más cercanos a esta. No obstante, existe una cantidad *mínima* y bien definida de energía necesaria para desprender un electrón, denominada **trabajo de desprendimiento de electrones**, Φ, de la superficie metálica. A los diferentes metales les corresponden distintos valores del trabajo de desprendimiento de electrones. Por ejemplo, para una superficie de cinc limpia este trabajo toma el valor 4,3 eV, lo que significa que hay que realizar un trabajo de 4,3 eV ($6{,}9 \times 10^{-19}$ J) *como mínimo* para desprender un electrón de la superficie metálica de cinc.

Para comprender el efecto fotoeléctrico necesitamos comparar la energía del fotón, hf, con el trabajo de desprendimiento de electrones, Φ, del metal:

- $hf < \Phi$

  Si la energía del fotón incidente es inferior al trabajo de desprendimiento de electrones, el efecto fotoeléctrico no puede tener lugar. Una radiación que puede producir un efecto fotoeléctrico en un metal determinado puede no tener el mismo efecto en otro metal (con un trabajo de desprendimiento de electrones de distinta magnitud).

- $hf\,(= hf_0) = \Phi$

  Cuando la frecuencia del fotón incidente es exactamente la *frecuencia umbral*, f_0, el fotón incidente tiene exactamente la misma energía que el trabajo de desprendimiento de electrones del metal. Podemos suponer que sí tiene lugar efecto fotoeléctrico, aunque la energía cinética de los electrones liberados es nula.

- $hf > \Phi$

  Si la energía del fotón incidente es superior al trabajo de desprendimiento de electrones del metal, tiene lugar efecto fotoeléctrico y se libera un fotoelectrón. Los fotoelectrones producidos por diferentes fotones (de la misma frecuencia) presentan un espectro de distintas energías cinéticas porque se han empleado distintas cantidades de trabajo para liberarlos.

Es importante considerar la situación en la que se realiza la *mínima* cantidad de trabajo para desprender un electrón (igual al trabajo de desprendimiento de electrones):

$$\begin{matrix}\text{energía transportada}\\ \text{por el fotón}\end{matrix} = \begin{matrix}\text{trabajo de desprendimiento}\\ \text{de electrones}\end{matrix} + \begin{matrix}\text{energía cinética } \textit{máxima}\\ \text{del fotoelectrón}\end{matrix}$$

O bien, utilizando símbolos:

$$hf = \Phi + E_{máx}$$

O:

$$E_{máx} = hf - \Phi$$

Esta ecuación se suele denominar ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico y figura en el *Apéndice de datos de Física*. Como $hf_0 = \Phi$, también la podemos escribir de la forma siguiente:

$$hf = hf_0 + E_{máx}$$

En la Figura 12.3 tenemos una representación gráfica de la variación de la energía cinética máxima de los fotones emitidos con respecto a la frecuencia de los fotones incidentes. La ecuación de la recta es $E_{máx} = hf - \Phi$, como arriba.

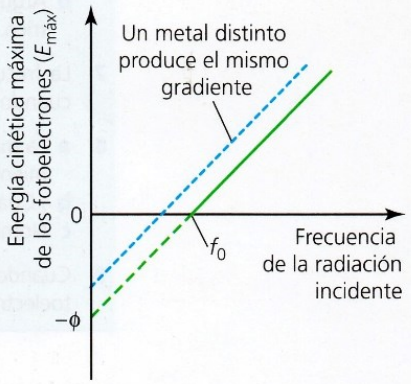


Figura 12.3
Variación teórica de la energía cinética máxima de los fotoelectrones con respecto a la frecuencia incidente (para dos metales distintos)

A partir de la gráfica podemos obtener las medidas siguientes:

- La pendiente de la recta es igual a la constante de Planck, h. (Comparemos la ecuación de la recta con $y = mx + c$). La pendiente es la misma en todas las circunstancias porque no depende de las frecuencias de los fotones o del metal utilizado.
- El corte con el eje horizontal (frecuencias) nos da el valor de la frecuencia umbral, f_0.
- Podemos determinar el valor del trabajo de desprendimiento de electrones a partir de:
  - **i** cuando $E_{máx} = 0$, $\Phi = hf_0$; o bien
  - **ii** cuando $f = 0$, $\Phi = -E_{máx}$

Ejemplo resuelto

1 Una radiación de longitud de onda $5{,}59 \times 10^{-8}$ m incide sobre una superficie metálica cuyo trabajo de desprendimiento de electrones es 2,71 eV.

a ¿Cuál es la frecuencia de la radiación?
b ¿Cuánta energía transporta un único fotón de la radiación?
c ¿Cuál es el valor del trabajo de desprendimiento de electrones en julios?
d ¿Se produciría efecto fotoeléctrico en estas circunstancias?
e ¿Cuál es la energía cinética máxima de los fotoelectrones?
f ¿Cuál es la frecuencia umbral para este metal?
g Esboza una gráfica completamente rotulada donde se represente la variación de la energía cinética máxima de los fotoelectrones con respecto a la frecuencia de la radiación incidente.

a $f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3{,}00 \times 10^8}{5{,}59 \times 10^{-8}} = 5{,}37 \times 10^{15}\,\text{Hz}$

b $E = hf$

$E = (6{,}63 \times 10^{-34}) \times (5{,}37 \times 10^{15})$

$E = 3{,}56 \times 10^{-18}\,\text{J}$

c $2{,}71 \times (1{,}60 \times 10^{-19}) = 4{,}34 \times 10^{-19}\,\text{J}$

d Sí, porque la energía de cada fotón es superior al trabajo de desprendimiento de electrones.

e $E_{máx} = hf - \Phi$

$E_{máx} = (3{,}56 \times 10^{-18}) - (4{,}34 \times 10^{-19}) = 3{,}13 \times 10^{-18}\,\text{J}$

f $\Phi = hf_0$ por tanto $f_0 = \frac{\Phi}{h} = \frac{4{,}34 \times 10^{-19}}{6{,}63 \times 10^{-34}} = 6{,}54 \times 10^{-14}\,\text{Hz}$

g La gráfica debería ser similar a la de la Figura 12.3 y los valores numéricos se obtendrían a partir de las intersecciones con los ejes.

5 Repite el ejercicio resuelto anterior para una radiación de longitud de onda $6{,}11 \times 10^{-7}$ m incidente sobre un metal con un trabajo de desprendimiento de electrones de 2,21 eV. Omite el apartado **e**.

6 **a** Explica cómo utilizó Einstein el concepto de fotón para explicar el efecto fotoeléctrico.
b Argumenta por qué un modelo ondulatorio de la radiación electromagnética no puede explicar el efecto fotoeléctrico.

7 La frecuencia umbral de un metal es $7{,}0 \times 10^{14}$ Hz. Calcula la energía cinética máxima emitida por los electrones cuando la frecuencia de la radiación incidente sobre el metal es $1{,}0 \times 10^{15}$ Hz.

8 **a** La mayor longitud de onda que emiten los fotoelectrones del potasio es 550 nm. Calcula el trabajo de desprendimiento de electrones (en julios).
b ¿Cuál es la longitud de onda umbral para el potasio? ¿Cómo se denomina este tipo de radiación?
c Nombra uno de los colores de la luz visible que no produce efecto fotoeléctrico en el potasio.

9 Cuando una radiación electromagnética de frecuencia $2{,}90 \times 10^{15}$ Hz incide sobre una superficie metálica, los fotoelectrones emitidos tienen una energía cinética máxima de $9{,}70 \times 10^{-19}$ J. Calcula la frecuencia umbral del metal.

Experimentos para comprobar el modelo de Einstein

Investigación de los potenciales de frenado

Para poder comprobar la ecuación (modelo) de Einstein para el efecto fotoeléctrico hay que medir la energía cinética máxima de los fotoelectrones emitidos bajo diversas circunstancias. Para ello, la energía cinética se debe transferir en otra forma de energía (medible).

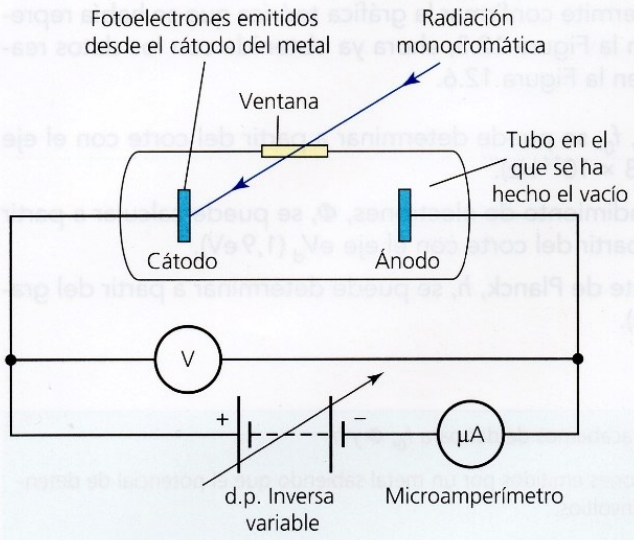


Figura 12.4
Experimento para comprobar el modelo de Einstein para la fotoelectricidad

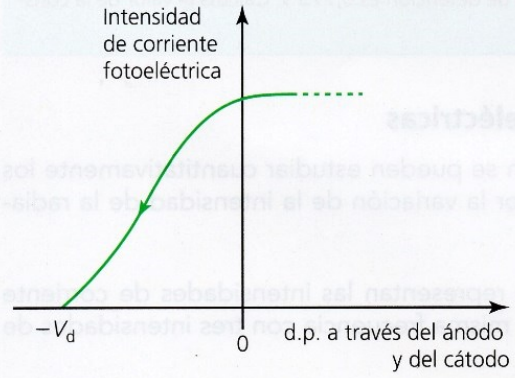


Figura 12.5
El aumento de la d.p. inversa provoca la disminución de la intensidad de corriente fotoeléctrica

Si los fotoelectrones son repelidos por un voltaje (potencial) negativo, la energía cinética de los fotoelectrones se puede transferir en forma de energía potencial eléctrica. El físico estadounidense Robert Millikan fue el primero en llevar a cabo este experimento, del cual podemos ver una versión simplificada en la Figura 12.4.

En teoría se debería emplear radiación *monocromática*, pero también es posible emplear un rango estrecho de frecuencias, como las que se obtienen mediante el uso de filtros coloreados y luz blanca.

Cuando la radiación incide sobre una superficie de emisión adecuada, se desprenden electrones con un espectro de energías distintas, tal como se explicó anteriormente. Como la superficie emite carga negativa, se puede describir como un **cátodo** (el sentido convencional de circulación de la corriente por un circuito es hacia fuera del cátodo). Cualquier fotoelectrón con la suficiente energía cinética es capaz de moverse por el tubo y alcanzar el otro electrodo, el **ánodo**. En el tubo *se ha hecho el vacío* (se ha eliminado el aire del interior) de manera que los electrones no colisionan con moléculas de aire durante su movimiento a través del tubo.

La característica más importante a tener en cuenta en este circuito es que la fuente de d.p, está conectada «al revés». Decimos entonces que está suministrando una **diferencia de potencial inversa** a través del tubo, lo que significa que hay un voltaje (potencial) negativo en el ánodo que *repele* los fotoelectrones. La energía cinética de los fotoelectrones que se mueven hacia el ánodo se reduce a medida que se transfiere en forma de energía potencial eléctrica. (Las medidas de las diferencias de potencial positivas se pueden llevar a cabo reconectando la batería del modo «correcto»).

Con un amperímetro sensible (microamperímetro o picoamperímetro) se puede medir cualquier flujo de carga a través del tubo y alrededor del circuito. A medida que el potencial inverso del ánodo aumenta desde cero, el número de fotoelectrones que pueden alcanzar el ánodo es cada vez menor y por tanto disminuye la intensidad de corriente. (Recordemos que los fotoelectrones tienen un espectro de energías distintas). Al cabo de un tiempo el potencial es lo suficientemente elevado para detener incluso a los fotoelectrones más energéticos y la intensidad de corriente cae hasta el valor cero (Figura 12.5).

El potencial en el ánodo necesario para detener a la totalidad de los fotoelectrones que lo alcanzan se denomina **potencial de detención**, V_d.

Como, por definición, la diferencia de potencial = energía transferida/carga, después de medir V_d podemos utilizar la ecuación siguiente para calcular los valores de la energía cinética máxima de los fotoelectrones bajo diversas circunstancias:

$$E_{máx} = eV_d$$

Por conveniencia, es frecuente utilizar la unidad electronvoltio (eV) para todas las energías asociadas al efecto fotoeléctrico. En ese caso, la energía cinética máxima de los fotoelectrones es

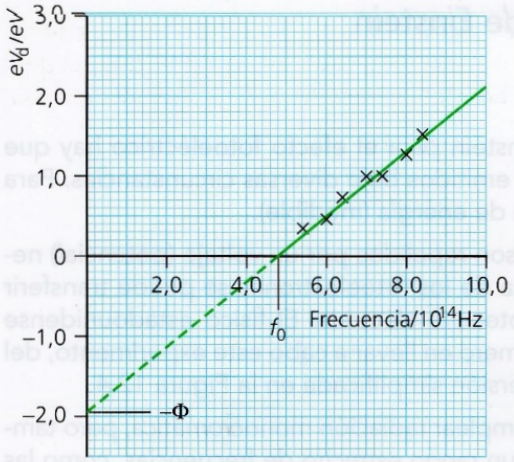


Figura 12.6
Resultados experimentales que muestran la variación de la energía potencial máxima (eV_d) de los fotoelectrones con la frecuencia incidente

numéricamente igual al potencial de detención. Es decir, si el potencial de detención es, por ejemplo, 3 V, entonces $E_{máx} = 3\,eV$.

La ecuación de Einstein ($E_{máx} = hf - \Phi$) se puede reescribir como:

$$eV_d = hf - \Phi$$

La determinación *experimental* del potencial de detención para un rango de frecuencias distintas permite confirmar la gráfica *teórica* que se había representado anteriormente en la Figura 12.3, ahora ya obtenida con los datos reales, tal como se muestra en la Figura 12.6.

- La frecuencia umbral, f_0, se puede determinar a partir del corte con el eje de las frecuencias ($4{,}8 \times 10^{14}$ Hz).
- El trabajo de desprendimiento de electrones, Φ, se puede calcular a partir de $\Phi = hf_0$, o bien a partir del corte con el eje eV_d (1,9 eV).
- El valor de la constante de Planck, h, se puede determinar a partir del gradiente ($6{,}5 \times 10^{-34}$ J s).

10 Utiliza la Figura 12.6 para confirmar los valores que acabamos de dar para f_0, Φ y h.

11 Calcula la energía cinética máxima de los fotoelectrones emitidos por un metal sabiendo que el potencial de detención es 2,4 eV. Da tu respuesta en julios y en electronvoltios.

12 Copia la Figura 12.5 y añade curvas para representar los resultados que se obtendrían con:
a la misma radiación, pero con un metal cuyo trabajo de desprendimiento de electrones es mayor
b el metal original y la misma frecuencia de radiación, pero utilizando una radiación de mayor intensidad.

13 En un experimento en el que se utiliza radiación monocromática de frecuencia $7{,}93 \times 10^{14}$ Hz con un metal cuya frecuencia umbral es $6{,}11 \times 10^{14}$ Hz, se observa que el potencial de detención es 0,775 V. Calcula el valor de la constante de Planck a partir de estos resultados.

Estudio de las intensidades de corriente fotoeléctricas

Con un aparato similar al de la Figura 12.4 también se pueden estudiar cuantitativamente los efectos producidos sobre la intensidad de corriente por la variación de la intensidad de la radiación, la frecuencia, y el metal utilizado en el cátodo.

- **Intensidad de la radiación** – En la Figura 12.7 se representan las intensidades de corriente producidas por una radiación monocromática de la misma frecuencia con tres intensidades de radiación distintas.

  Para potenciales positivos, todas las intensidades de corriente se mantienen constantes porque los fotoelectrones alcanzan el ánodo a la misma velocidad a la que son generados en el cátodo, y esto no depende de la magnitud de la diferencia de potencial en el ánodo.

  Cuando la intensidad de la radiación aumenta (con la misma frecuencia) se producen corrientes fotoeléctricas de mayor intensidad porque hay más fotones que desprenden a su vez más fotoelectrones (del mismo espectro de energía).

  Como la energía cinética máxima de los fotoelectrones depende solo de la frecuencia y no de la intensidad de la radiación, todas estas gráficas presentan el mismo valor del potencial de detención, V_d.

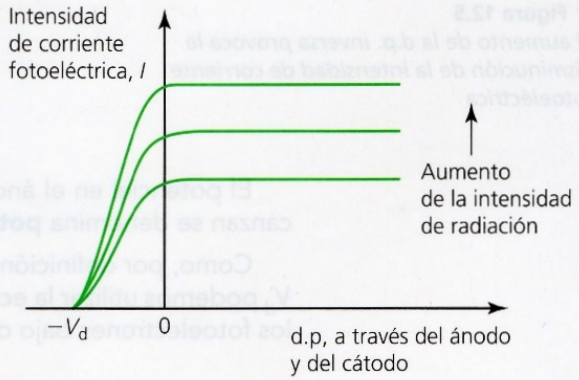


Figura 12.7
Variación de la intensidad de corriente fotoeléctrica con la d.p. para una radiación con tres intensidades distintas (y la misma frecuencia)

- **Frecuencia** – En la Figura 12.8 se representan las intensidades de corriente producidas por la radiación de dos fuentes monocromáticas de distintas frecuencias, A y B, que inciden sobre el mismo metal.

Los fotones individuales de la radiación A deben tener más energía (que los de B) y generar fotoelectrones con una mayor energía cinética máxima. Podemos hacer esta afirmación porque vemos que se necesita un mayor potencial inverso para detener los fotoelectrones generados en A, más energéticos.

El hecho de que, en la gráfica, la intensidad de corriente de A sea superior a la de B no permite, sin embargo, establecer conclusiones, dado que las intensidades de ambas radiaciones son desconocidas. Si se diera el caso (improbable) de que ambas intensidades de radiación fueran iguales, la intensidad de corriente máxima de B tendría que ser superior a la de A porque la radiación de B debe tener más fotones, dado que cada fotón tiene menos energía que en A.

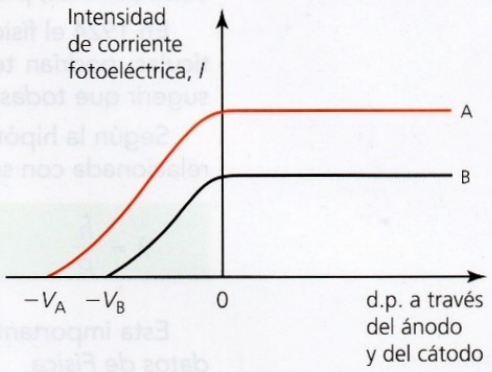


Figura 12.8
Variación de la intensidad de corriente fotoeléctrica con la d.p. para radiación de dos frecuencias distintas

- **Metal utilizado en el cátodo** – Los experimentos confirman que cuando se someten a examen diferentes metales utilizando la misma frecuencia, se observa efecto fotoeléctrico con algunos de ellos pero no con otros (para los que el trabajo de desprendimiento de electrones es superior a la energía de los fotones).

Los diodos emisores de luz (LEDs) también se pueden utilizar para estudiar el efecto fotoeléctrico (en «inverso»). Los electrones de una corriente eléctrica que atraviesan un LED experimentan transiciones energéticas precisas e idénticas que tienen como resultado la emisión de fotones de la misma longitud de onda (única). Si se mide la diferencia de potencial a través de un LED justo cuando comienza a emitir luz, se puede utilizar para determinar el valor de la constante de Planck.

14 Copia la Figura 12.5 y añade los resultados que se obtendrían utilizando radiación de una mayor intensidad (y de la misma frecuencia) incidente sobre un metal que tiene un trabajo de desprendimiento de electrones menor.

15 Copia la Figura 12.8 (solo la curva A). Añade la curva que representa los resultados que se obtendrían con radiación de una frecuencia mayor pero con el mismo número de fotones incidentes sobre el metal por segundo.

16 **a** Escoge cinco elementos metálicos distintos y busca en Internet sus trabajos de desprendimiento de electrones.
b Calcula las frecuencias umbral de los cinco metales.

17 El voltaje a través de un LED se incrementa justo hasta que comienza a emitir luz verde de longitud de onda $5{,}6 \times 10^{-7}$ m. Determina el valor de la constante de Planck sabiendo que el voltaje es 2,2 V.

Perspectivas adicionales

Naturaleza fotónica de la radiación electromagnética: el efecto Compton

Este efecto, que fue descubierto en Estados Unidos en 1923 por Arthur Compton, ofrece más pruebas de la naturaleza fotónica de la radiación electromagnética.

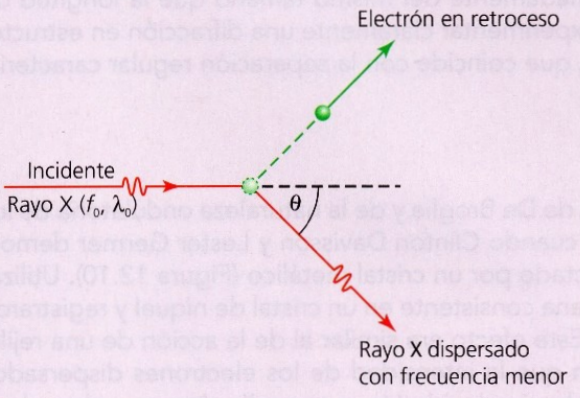


Figura 12.9
Dispersión Compton de rayos X

Se demostró que los rayos X podían ser dispersados por electrones, obteniéndose rayos X dispersados de frecuencia menor, porque parte de la energía de los fotones pasa al electrón dispersado. Véase la Figura 12.9.

En esta interacción se conserva, como siempre, la cantidad de movimiento (o momento lineal). Este experimento demuestra que un rayo X se comporta como si fuera una partícula portadora de una cantidad de movimiento, $p = h/\lambda$, aunque no tenga masa. La explicación de este comportamiento requiere una teoría más avanzada y solo es posible porque los fotones viajan a la velocidad de la luz. Se puede decir lo mismo de todos los demás fotones (incluyendo los luminosos).

1 Utiliza la ecuación del efecto Compton $\Delta\lambda = (h/m_e c)(1 - \cos\theta)$ para predecir el cambio en la longitud de onda asociado a un ángulo de dispersión de 30°.

2 Utiliza la ecuación para explicar por qué la dispersión Compton de la luz no es significativa.

Ondas de materia

El hecho de que la luz y otras radiaciones electromagnéticas se puedan comportar como partículas (fotones) plantea una pregunta obvia: ¿se pueden comportar las partículas como ondas?

En 1924 el físico francés Louis de Broglie propuso que los electrones, que se consideraban partículas, podrían tener también carácter ondulatorio. Posteriormente generalizó su hipótesis para sugerir que *todas* las partículas en movimiento tenían naturaleza ondulatoria.

Según la hipótesis de De Broglie, la longitud de onda, λ, de una partícula en movimiento está relacionada con su momento lineal, p, mediante la ecuación:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Esta importante ecuación, denominada **hipótesis de De Broglie**, *no* figura en el *Apéndice de datos de Física*.

h es la constante de Planck. Una vez más, podemos ver la importancia de esta constante en la predicción de la magnitud de los fenómenos cuánticos. El valor tan pequeño de la constante de Planck nos indica que las propiedades ondulatorias de las partículas solo son significativas para aquellas cuyos momentos lineales son muy pequeños, tal como ilustran los ejemplos siguientes.

Ejemplo resuelto

2 Calcula el momento lineal de una partícula en movimiento sabiendo que su longitud de onda de De Broglie es 200 pm (1 pm = 1×10^{-12} m).

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

$$p = \frac{6{,}63 \times 10^{-34}}{2{,}00 \times 10^{-10}} = 3{,}32 \times 10^{-24}\,\text{kg m s}^{-1}$$

Este ejemplo nos indica que si existieran longitudes de onda de De Broglie para los objetos de uso cotidiano (que, claramente, no son partículas individuales), serían tan enormemente pequeñas que no se podrían medir. No obstante, algunas partículas subatómicas, como los electrones, poseen masas y momentos tan pequeños que sus propiedades ondulatorias se pueden detectar experimentalmente.

Para demostrar que las partículas tienen propiedades ondulatorias es necesario observar que exhiben un comportamiento ondulatorio característico y, en particular, que se pueden difractar. En 1920 ya se podían generar con facilidad haces de electrones, de modo que constituían la elección óptima para investigar la posibilidad de la difracción de partículas.

La hipótesis de De Broglie predice que un electrón que viaja en un haz con una velocidad característica de 5×10^6 m s^{-1} (y por tanto un momento de unos 9×10^{-25} kg m s^{-1}) tendrá una longitud de onda de unos 1×10^{-10} m. En el Capítulo 4 vimos que los efectos de la difracción son mayores si las aberturas de difracción son aproximadamente del mismo tamaño que la longitud de onda, de manera que los electrones deberían experimentar claramente una difracción en estructuras con un espaciado del orden de 1×10^{-10} m, que coincide con la separación regular característica de los iones en un material cristalino.

Experimento de Davisson-Germer

La confirmación experimental de la hipótesis de De Broglie y de la naturaleza ondulatoria de los electrones se obtuvo por vez primera en 1927, cuando Clinton Davisson y Lester Germer demostraron que un haz de electrones podía ser difractado por un cristal metálico (Figura 12.10). Utilizaron un haz de electrones disparado hacia una diana consistente en un cristal de níquel y registraron los electrones dispersados a distintos ángulos. Este efecto era similar al de la acción de una rejilla de difracción-reflexión (Capítulo 9). Observaron que la intensidad de los electrones dispersados variaba con el ángulo, y que también dependía de su velocidad (que se podía alterar cambiando la diferencia de potencial aceleradora).

Anteriormente se habían realizado numerosos estudios sobre la difracción de rayos X (que también tienen longitudes de onda del orden de 10^{-10} m) en cristales metálicos, de manera que el espaciado entre capas de átomos del cristal de níquel ya era conocido. El ángulo para el que se registró la máxima intensidad de los electrones dispersados concordaba con el ángulo predicho por la interferencia constructiva de ondas debida a las capas de átomos de la superficie del cristal metálico, y esta concordancia se utilizó para confirmar la hipótesis de De Broglie.

La difracción de electrones se puede demostrar experimentalmente en laboratorios escolares mediante un tubo en el que se ha hecho el vacío y una fuente de alto voltaje. Se acelera un haz de electrones en un *cañón de electrones* mediante una diferencia de potencial elevada, y a continuación se dirige hacia una lámina muy fina de grafito (átomos de carbono) (Figura 12.11). Los electrones son difractados por la estructura regular de los átomos de carbono y forman un patrón de difracción sobre la pantalla que consiste en una serie de anillos concéntricos.

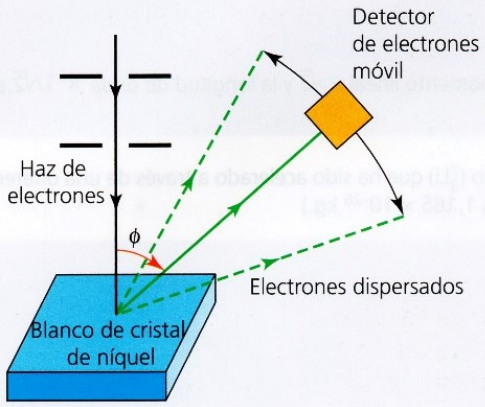


Figura 12.10
Principio en el que se basa el experimento de Davisson y Germer. Los resultados de este experimento solo se pueden explicar suponiendo que los electrones tengan propiedades ondulatorias y, por tanto, se puedan difractar y puedan interferir

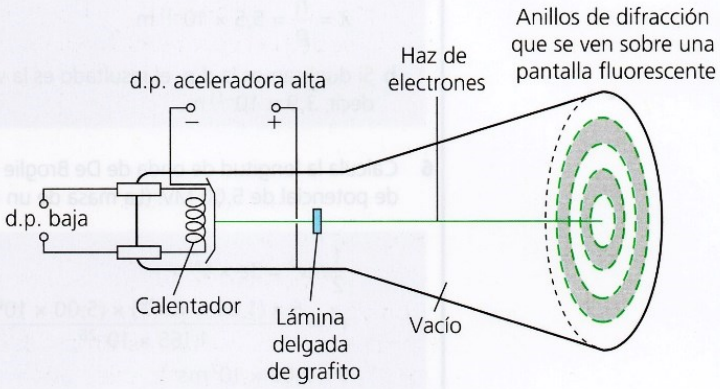


Figura 12.11
Un aparato de difracción de electrones

Si se aumenta la d.p. aceleradora utilizada en la Figura 12.11, los electrones adquieren una energía cinética y un momento lineal más elevados. La hipótesis de De Broglie predice correctamente que los electrones tendrán entonces una longitud de onda más corta y que, en consecuencia, serán difractados a través de ángulos menores. Los anillos que se ven en la pantalla de la Figura 12.11 estarán más próximos entre sí (y serán más brillantes).

Además de la difracción de electrones, se ha observado también la difracción de protones, neutrones e iones de masa pequeña.

Ejemplos resueltos

3 Calcula la longitud de onda de De Broglie de un electrón que viaja con una velocidad de $1{,}0 \times 10^7\,\text{m s}^{-1}$.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6{,}63 \times 10^{-34}}{(9{,}110 \times 10^{-31}) \times (1{,}0 \times 10^7)} = 7{,}3 \times 10^{-11}\,\text{m}$$

4 Estima una posible longitud de onda de De Broglie para una pelota de masa 0,058 kg que se mueve con una velocidad de $10^2\,\text{m s}^{-1}$.

$p = mv$; $p = 0{,}058 \times 10^2 = 5{,}8\,\text{kg m s}^{-1}$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6{,}63 \times 10^{-34}}{5{,}8} \approx 10^{-34}\,\text{m}$$

Para que la pelota pudiera exhibir propiedades ondulatorias tendría que interactuar como si se tratara de un objeto con dimensiones del orden de 10^{-34} m (más de un millón de millones de millones de veces más pequeño que el núcleo de un átomo). Por tanto, la pelota no exhibe ninguna propiedad ondulatoria detectable o medible.

5 Calcula la longitud de onda de De Broglie de un electrón que ha sido acelerado a través de una diferencia de potencial de:
a 500 V
b 1 000 V.

a La velocidad de los electrones se puede calcular mediante la ley de conservación de la energía: la pérdida de energía potencial eléctrica = la ganancia de energía cinética.

$$Ve = \frac{1}{2}mv^2$$

$$v = \sqrt{\frac{2Ve}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 500 \times 1{,}60 \times 10^{-19}}{9{,}110 \times 10^{-31}}} = 1{,}32 \times 10^{7}\,\text{m s}^{-1}$$

$$p = mv = 1{,}2 \times 10^{-23}\,\text{kg m s}^{-1}$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = 5{,}5 \times 10^{-11}\,\text{m}$$

b Si duplicamos la d.p. el resultado es la velocidad $\times \sqrt{2}$, el momento lineal $\times \sqrt{2}$ y la longitud de onda $\times 1/\sqrt{2}$, es decir, $3{,}9 \times 10^{-11}$ m.

6 Calcula la longitud de onda de De Broglie de un núcleo de litio ($^{7}_{3}$Li) que ha sido acelerado a través de una diferencia de potencial de 5,00 MV. (La masa de un núcleo de litio–7 es $1{,}165 \times 10^{-26}$ kg.)

$$\frac{1}{2}mv^2 = 3e \times V$$

$$v^2 = \frac{6 \times (1{,}60 \times 10^{-19}) \times (5{,}00 \times 10^{6})}{1{,}165 \times 10^{-26}} = 4{,}12 \times 10^{14}$$

$$v = 2{,}03 \times 10^{7}\,\text{m s}^{-1}$$

$$\lambda = \frac{6{,}63 \times 10^{-34}}{(1{,}165 \times 10^{-26}) \times (2{,}03 \times 10^{7})} = 2{,}80 \times 10^{-15}\,\text{m}$$

18 Calcula la longitud de onda de un electrón que se desplaza a una velocidad de $2{,}05 \times 10^{7}\,\text{m s}^{-1}$.

19 Un neutrón tiene una longitud de onda de De Broglie de 800 pm. Calcula su velocidad sabiendo que su masa es $1{,}675 \times 10^{-27}$ kg.

20 La masa de un electrón es $9{,}1 \times 10^{-31}$ kg y su energía cinética es $3{,}0 \times 10^{-25}$ kg. Calcula su longitud de onda de De Broglie en metros.

21 ¿A qué diferencia de potencial hay que acelerar a un electrón en reposo para que tenga una longitud de onda de $1{,}2 \times 10^{-10}$ m?

22 **a** ¿Quién dirías que tiene una mayor longitud de onda de De Broglie: un protón o un electrón (viajando ambos a la misma velocidad)? Argumenta tu respuesta.

b Las partículas (no relativistas) siguientes tienen todas la misma energía cinética. Clasifícalas según sus longitudes de onda de De Broglie, empezando por las más largas primero: electrón, partícula alfa, neutrón y núcleo de átomo de oro.

23 Explica por qué un avión en movimiento no presenta propiedades ondulatorias detectables.

24 Diseña una hoja de cálculo para electrones, protones y partículas alfa que convierta los valores de la masa y de la velocidad en momento lineal y en longitud de onda (utilizando la ecuación de De Broglie).

25 Calcula la longitud de onda de un protón acelerado (desde el estado de reposo) por una diferencia de potencial de 1850 V (masa del protón = $1{,}673 \times 10^{-27}$ kg).

Naturaleza de la ciencia

Dualidad onda-partícula

El descubrimiento de que las ondas de radiación se pueden comportar como partículas, y que las partículas a su vez se pueden comportar como ondas, provocó inevitablemente que los físicos tuvieran que reconsiderar su comprensión de muchas ideas fundamentales. Resultó ser un cambio de paradigma espectacular en la percepción de los científicos sobre los ingredientes básicos del universo. Quedó claro que el hecho de etiquetar algo como onda o como partícula, en concordancia con nuestra percepción del mundo a gran escala que nos rodea, no era una descripción adecuada. Y no se trata de que haya una confusión o una ambigüedad, sino de que los modelos y visualizaciones simples no son capaces de describir completamente la naturaleza de las propiedades microscópicas (a escala cuántica) de la materia y de la radiación. En todo caso, ¿es que deberían describirla?

En el nivel de física que estamos estudiando unas veces necesitamos una explicación ondulatoria y otras veces una en forma de partículas. Y en ocasiones necesitamos las dos, como cuando utilizamos el concepto de frecuencia para determinar la energía que transporta una partícula (fotón). Si aumentamos el nivel de conocimiento matemático (más allá del nivel del IB), es posible desarrollar modelos más sofisticados, aunque no nos ofrecen más ayuda proporcionando imágenes mentales que faciliten la comprensión.

Antimateria

Los conceptos de materia y antimateria se introdujeron brevemente en el Capítulo 7. A continuación estudiaremos con un poco más de detalle cómo se crean las antipartículas, y qué sucede cuando una partícula se encuentra con su antipartícula.

Producción y aniquilación de pares

Para toda partícula elemental existe una **antipartícula** que tiene la misma masa que la partícula original, carga opuesta (si es que está cargada), y números cuánticos opuestos.

(Hay unas pocas partículas sin carga, como por ejemplo los fotones, que se considera que son sus propias antipartículas).

Algunos ejemplos:

- Un *antielectrón*, e^+ (conocido como *positrón*), tiene la misma masa que un *electrón*, e^-, y una carga de igual módulo pero de signo opuesto (positivo en lugar de negativo). El positrón tiene un número leptónico igual a –1 y un electrón tiene un número leptónico igual a +1.
- Un *antineutrón*, $\bar{n}$, tiene la misma masa que un *neutrón*, n, y tampoco tiene carga. El antineutrón tiene un número bariónico igual a –1 y el neutrón tiene un número bariónico igual a +1.
- Un *mesón pi negativo* (pión), π^-, contiene un quark anti-up (anti-arriba) y un quark down (abajo) y su carga es –1. Es la antipartícula del *pión pi positivo*, π^+, cuya carga es +1 porque contiene un quark anti-down (anti-abajo) y un quark up (arriba). El *pión neutro*, π^0, contiene un quark down (abajo) y un quark anti-down (anti-abajo), o bien un quark up (arriba) y un quark anti-up (anti-arriba). Se considera que es su propia antipartícula.
- Un *antineutrino* no tiene carga y su masa es muy pequeña. Un *neutrino* tampoco tiene carga y tiene la misma masa, pero tiene un número leptónico opuesto (+1).

Producción de pares

Las antipartículas se pueden producir en un proceso denominado **producción de pares**, en el que un fotón gamma se convierte en una partícula y su antipartícula. En la Figura 12.12 se representa la producción de pares de un electrón y un positrón cercano al núcleo. También se representó un diagrama de Feynman de este proceso en el Capítulo 7, Figura 7.48.

Para que este proceso sea posible, la energía transportada por el fotón debe ser mayor que la suma de las masas-energías en reposo del electrón y del positrón:

$$2m_e = 2 \times 0{,}511\,\text{MeV}c^{-2} = 1{,}022\,\text{MeV}c^{-2}$$

Utilizando la energía del fotón, $E = hf$:

$$(1{,}022 \times 10^6) \times (1{,}60 \times 10^{-19}) = (6{,}63 \times 10^{-34})f$$

$$f = 2{,}47 \times 10^{20}\,\text{Hz}$$

Esta es la mínima frecuencia que necesita el fotón para poder iniciar una producción de pares de un positrón y un electrón, y corresponde a un rayo gamma de longitud de onda $1{,}21 \times 10^{-12}$ m. Si el fotón transporta una energía mayor, esta se puede transferir en forma de energía cinética de las partículas creadas.

Los fotones gamma con energías considerablemente mayores pueden crear pares de partículas con más masa, por ejemplo muones y antimuones.

En los cálculos anteriores se ha tenido en cuenta el principio de conservación de la energía-masa, pero en la interacción también se conserva el momento lineal. Y es por este motivo que es necesario que haya alguna otra masa involucrada (en la Figura 12.12 la producción de pares tiene lugar en el campo electromagnético cercano a un núcleo): si no hubiera otra masa que adquiriera momento lineal, este no se podría conservar. Supongamos que las partículas creadas tuvieran velocidad nula: ¿cómo podríamos explicar la pérdida de momento lineal transportado por el fotón ($p = h/\lambda$) si no hubiera otra partícula involucrada? La probabilidad de una producción de pares aumenta cuanto mayor es la energía del fotón y mayor es el tamaño del núcleo.

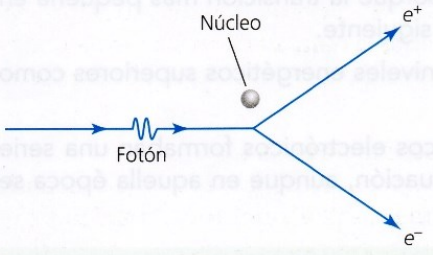


Figura 12.12
Producción de pares

Aniquilación de pares

Si una partícula y su antipartícula se combinan, la suma de su carga y de sus números cuánticos debe ser cero (por definición). Por tanto, mientras se obedezcan las leyes de conservación de la masa-energía y del momento lineal, no existe ningún principio físico que impida que la reacción entre dos partículas de este tipo dé lugar a la transferencia de toda su masa en energía. Este proceso se puede considerar opuesto a la producción de pares. La **aniquilación de pares** de un electrón y un positrón es el ejemplo más común.

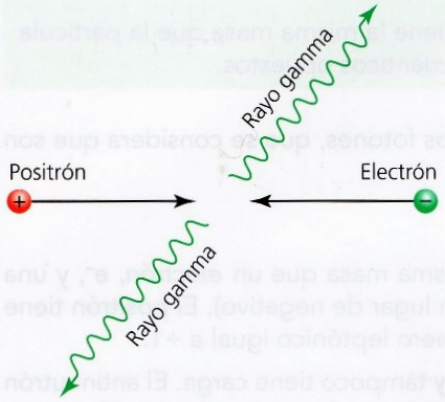


Figura 12.13
Aniquilación electrón-positrón. Cada fotón gamma transporta una energía mínima equivalente a la masa en reposo de una de las partículas (0,511 MeV)

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$

Si suponemos que la energía cinética o el momento lineal de las partículas son insignificantes, el resultado más simple es un par de fotones gamma que se mueven en sentidos opuestos, lo cual es condición necesaria para que se conserve el momento lineal (Figura 12.13). Si las partículas tienen una energía cinética mayor, la situación es más compleja.

Si se aniquilan partículas con más masa (que los electrones y los positrones), existen diversos resultados posibles.

Vivimos en un universo que está compuesto principalmente por materia (y no por antimateria), aunque se crea algo de antimateria mediante procesos naturales (por ejemplo, por los rayos cósmicos que interactúan con las capas superiores de la atmósfera o por la desintegración beta positiva). En los experimentos de física de altas energías también se crea antimateria. Y aunque la materia y la antimateria no pueden coexistir, las razones por las que el universo está compuesto por materia en lugar de antimateria (o viceversa) no se conocen del todo.

26 Si la frecuencia del fotón de la Figura 12.12 es $3{,}47 \times 10^{20}$ Hz, calcula la energía cinética (MeV) de cada una de las partículas producidas (supón que son iguales).

27 Si un protón y un antiprotón se aniquilan, ¿cuál es la máxima longitud de onda posible de los fotones creados?

28 Observa la Figura 12.13. Explica por qué se crean dos fotones con una energía de 0,511 MeV cada uno en lugar de un único fotón con una energía de 1,022 MeV.

29 Explica en qué sentido se diferencia un antiprotón de un protón.

30 Consulta en Internet cuáles son las últimas teorías respecto al equilibrio de antimateria/materia en los orígenes del universo.

31 Dibuja un diagrama de Feynman de una aniquilación electrón-positrón.

Cuantización del momento angular en el modelo de Bohr para el átomo de hidrógeno

El descubrimiento de las propiedades ondulatorias de las partículas, en concreto de los electrones, tuvo enormes consecuencias para los modelos atómicos establecidos por los físicos. Antes de considerar este tema con mayor detalle, vamos a revisar el modelo atómico predominante en aquella época (principios de la década de 1920).

En el Capítulo 7 se introdujo el concepto de niveles de energía atómicos discretos y cuantizados, como un método para explicar los espectros emitidos o absorbidos por los átomos, pero en esta discusión no se hacía demasiada referencia a su estructura interna. La Figura 12.14 es similar a la Figura 7.6 pero muestra algunas transiciones entre niveles energéticos electrónicos en átomos de hidrógeno. Los niveles de transición se han dispuesto en tres series, y cada una de ellas genera conjuntos distintos de líneas espectrales que no se solapan porque la transición más pequeña en una de las series es mayor que la mayor transición de la serie siguiente.

El estado fundamental está etiquetado como $n = 1$ y los niveles energéticos superiores como $n = 2$, $n = 3$ y así sucesivamente.

Se demostró fácilmente que los propios niveles energéticos electrónicos formaban una serie convergente que se podía describir mediante la siguiente ecuación, aunque en aquella época se desconocían los motivos subyacentes:

$$E = \frac{-13{,}6}{n^2}\ \text{eV}$$

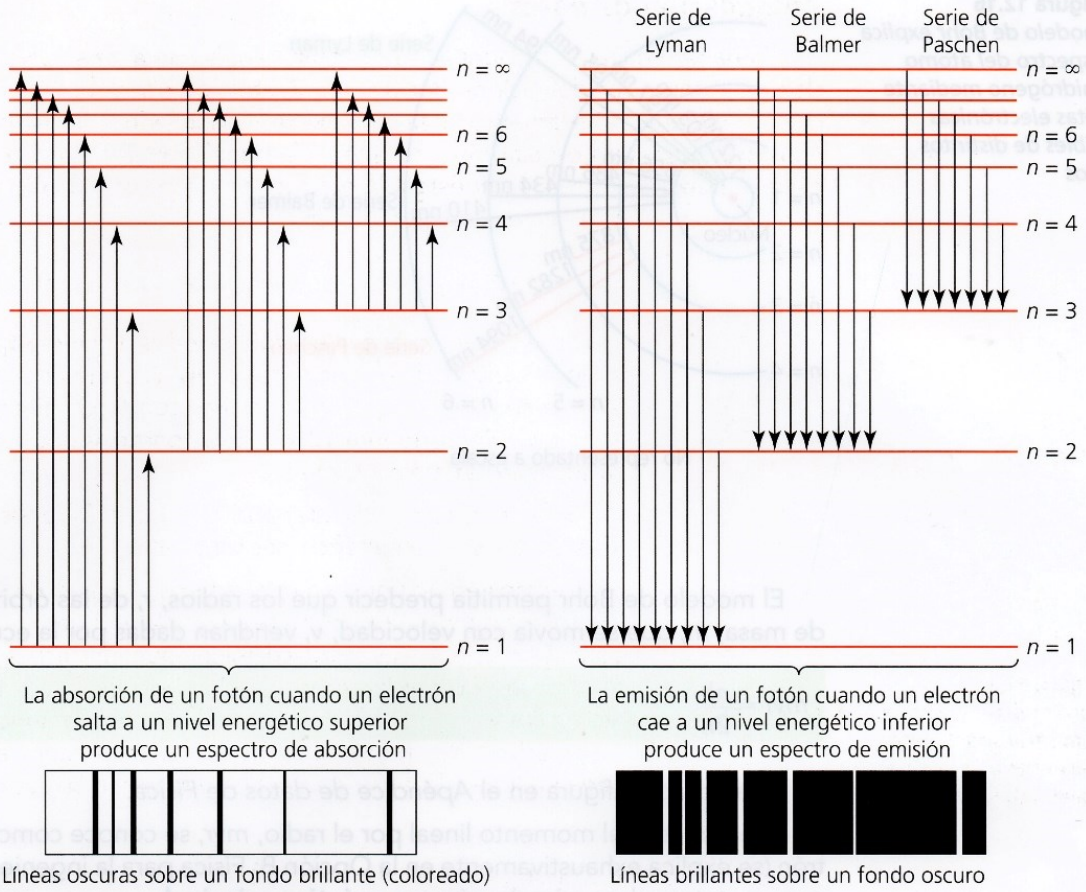


Figura 12.14
Series de Lyman, Balmer y Paschen del átomo de hidrógeno

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

- para $n = 1$, $E = -13{,}6/1^2 = -13{,}60\,\text{eV}$
- para $n = 2$, $E = -13{,}6/2^2 = -3{,}40\,\text{eV}$
- para $n = 3$, $E = -13{,}6/3^2 = -1{,}51\,\text{eV}$
- para $n = 4$, $E = -13{,}6/4^2 = -0{,}85\,\text{eV}$

y así sucesivamente, de forma que hay una serie infinita de niveles energéticos.

Después del nuevo modelo de átomo con un núcleo central propuesto por Rutherford en 1911, el físico danés Niels Bohr propuso una visualización del átomo que intentaba explicar la cuantización de los niveles energéticos y las series que se podían observar en el espectro del átomo de hidrógeno.

Naturaleza de la ciencia

Observaciones: la importancia de los espectros

En un primer momento podría parecer que los patrones observados en las líneas espectrales del hidrógeno no eran demasiado importantes, pero proporcionaron importantes pistas en el aprendizaje sobre la estructura de los átomos (comenzando por el más simple, el de hidrógeno). Esta era una cuestión prioritaria para los físicos en las primeras décadas del siglo XX, una época de grandes avances en la ciencia atómica.

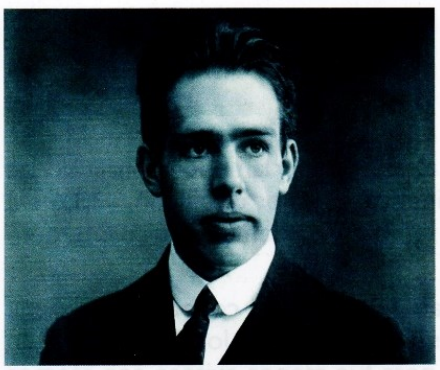


Figura 12.15
Niels Bohr

El **modelo atómico de Bohr**, propuesto por primera vez en 1913, consistía en electrones que orbitaban alrededor del núcleo a causa de la fuerza centrípeta debida a la atracción eléctrica entre cargas opuestas. Sin embargo, el modelo de Bohr restringía las órbitas electrónicas a unas determinadas distancias del núcleo y, lo que es más importante, como los electrones permanecían en sus órbitas, ni emitían radiación electromagnética ni perdían energía. A cada órbita le correspondía una energía definida y precisa, y las energías intermedias no estaban permitidas. Los fotones se emitían o se absorbían solo cuando los electrones se desplazaban entre estos niveles energéticos. Véase la Figura 12.16, en la que las distancias son indicativas de los radios de las órbitas y *no* de los niveles energéticos (las distancias no están representadas a escala).

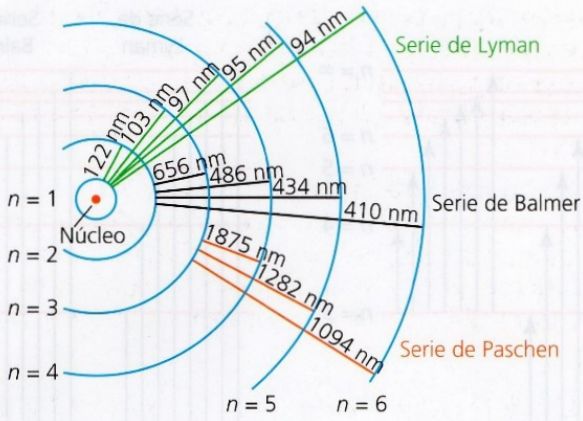


Figura 12.16
El modelo de Bohr explica el espectro del átomo de hidrógeno mediante órbitas electrónicas posibles de distintos radios

El modelo de Bohr permitía predecir que los radios, r, de las órbitas posibles para un electrón de masa, m, que se movía con velocidad, v, vendrían dadas por la ecuación siguiente:

$$mvr = \frac{nh}{2\pi}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

El producto del momento lineal por el radio, mvr, se conoce como **momento angular** del electrón (se explica exhaustivamente en la Opción B: Física para la ingeniería). En este modelo cuántico n es un entero denominado **número cuántico principal**.

Como indican los cálculos matemáticos siguientes, el modelo de Bohr combina la física clásica del movimiento circular y la fuerza de atracción eléctrica con conceptos cuánticos para predecir los radios de las órbitas y los niveles energéticos de los átomos de hidrógeno.

Igualando la fuerza centrípeta sobre el electrón a la fuerza de atracción eléctrica entre el protón y el electrón en un átomo de hidrógeno, obtenemos:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{kee}{r^2}$$

(k es la constante de Coulomb), que nos lleva a:

$$v = \sqrt{\frac{ke^2}{mr}}$$

Si introducimos la expresión anterior para v en la ecuación del momento angular (resaltada arriba), obtenemos:

$$\sqrt{ke^2mr} = \frac{nh}{2\pi}$$

y reagrupando términos podemos obtener una expresión para r:

$$r = \frac{n^2h^2}{4\pi^2ke^2m}$$

La sustitución $n = 1$ permitió a Bohr predecir el radio de la órbita del electrón cuando el átomo de hidrógeno se encuentra en su estado fundamental:

$$r = 5{,}3 \times 10^{-11}\,\text{m}$$

A continuación se pudo calcular la energía total asociada al estado fundamental utilizando las ecuaciones para la energía potencial eléctrica y la energía cinética. El valor calculado, –13,6 eV, confirmaba el valor ya conocido. El modelo de Bohr predecía también los demás niveles energéticos del átomo de hidrógeno.

El modelo atómico cuantizado de Bohr representó un gran avance en el conocimiento de la estructura atómica, y predijo de forma muy exacta los niveles energéticos de los átomos con un solo electrón, como el átomo de hidrógeno o el ion de helio, pero fue menos exitoso con átomos

que contenían más electrones. Además, las razones de la existencia de niveles energéticos tampoco se comprendían todavía. El modelo de Bohr continúa siendo un importante punto de partida para el aprendizaje de la cuantización atómica, pero el descubrimiento de las propiedades ondulatorias de los electrones condujo rápidamente a cambios espectaculares en la comprensión de los átomos por parte de los físicos.

Denominamos **mecánica cuántica** a la importante rama de la Física que trata de sucesos que se producen en las escalas atómica y subatómica, y que están asociados a cantidades que solo pueden tomar valores discretos (cuantizados). En el mundo cuántico, las leyes de la física clásica tienen poca aplicación, y si intentamos aplicar el conocimiento y la intuición adquiridos al observar el mundo macroscópico que nos rodea, a menudo solo obtenemos confusión.

32 Determina el momento angular de un electrón situado en la quinta órbita de un átomo de hidrógeno **a** en términos de h/π, y **b** en unidades del SI.

33 **a** Calcula el radio de la tercera órbita respecto al estado fundamental del átomo de hidrógeno.
b ¿Cuál es el radio predicho para la órbita de mayor diámetro?

34 **a** Calcula la energía cinética (J) de un electrón en el estado fundamental del átomo de hidrógeno.
b Calcula el potencial eléctrico (J) del átomo en su estado fundamental.
c Determina la energía total del átomo (J).
d Convierte tu respuesta a electronvoltios.
e Explica por qué la respuesta lleva signo negativo.

35 **a** Utiliza los datos de la Figura 12.14 para determinar la menor frecuencia de la serie de Balmer.
b ¿En qué zona del espectro electromagnético se encuentra esta frecuencia?
c Calcula la energía menor (eV) transportada por cualquiera de los fotones involucrados en las cinco transiciones representadas en la serie de Paschen.

Encaje de las ondas electrónicas en el interior de los átomos

Tras el descubrimiento de las propiedades ondulatorias de los electrones, había que modificar de forma significativa el modelo de la estructura del átomo. No obstante, ya nos hemos encontrado con ideas similares: en el Capítulo 4 estudiamos las ondas «atrapadas» en espacios confinados y la formación de *ondas estacionarias* mecánicas, como las que observamos en un muelle elongado.

Si consideramos la existencia de un electrón como un número entero de ondas estacionarias confinadas en el interior de la circunferencia de una de las órbitas de Bohr (de radio r), las posibles longitudes de onda estacionarias se pueden describir mediante la ecuación:

$$n\lambda = 2\pi r$$

Comparando esta expresión con $\lambda = h/p$ (con $p = mv$) es fácil demostrar que:

$$mvr = \frac{nh}{2\pi}$$

como anteriormente.

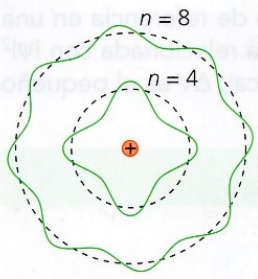


Figura 12.17
Ondas estacionarias electrónicas en los niveles cuarto y octavo del átomo de hidrógeno

En otras palabras, el concepto de existencia del electrón en forma de onda estacionaria en el átomo de hidrógeno confirma satisfactoriamente los niveles energéticos del modelo de átomo de Bohr.

En la Figura 12.17 se representan dos de los posibles patrones de ondas estacionarias para un electrón en un átomo de hidrógeno.

Aunque no deja de ser un modelo demasiado simplificado, antes de avanzar necesitamos profundizar en el conocimiento de las ondas de materia.

36 Demuestra que la ecuación $mvr = \frac{nh}{2\pi}$ se obtiene como consecuencia de encajar ondas estacionarias electrónicas en las circunferencias de sus órbitas alrededor del núcleo.

37 Calcula el momento angular de un electrón que se encuentra en su estado fundamental en el átomo de hidrógeno.

38 Haz un esquema donde representes un electrón en el nivel energético $n = 3$ del átomo de hidrógeno.



Figura 12.18
Erwin Schrödinger

La función de onda

La idea de que la luz y el sonido viajan en forma de ondas ha requerido que explicáramos la naturaleza de estas ondas (Capítulo 4). De manera similar, ahora necesitamos explicar la naturaleza ondulatoria de los electrones y de otras ondas asociadas a partículas. Sin embargo, no es algo que podamos representar mediante un dibujo simple o describir en unas pocas palabras, sino que para dar una explicación completa necesitamos un nivel avanzado de matemáticas, *que no se requiere en este curso.*

En 1926 el físico austríaco Erwin Schrödinger propuso un modelo mecánico-cuántico para describir el comportamiento de los electrones en el interior del átomo de hidrógeno. En la teoría de Schrödinger el electrón atómico se describe mediante una **función de onda** matemática, $\Psi(x,t)$, en función de la posición, x, y del tiempo, t. La función de onda es una descripción del estado (cuántico) de un electrón y representa todo lo que hay que saber sobre la partícula. La función de onda de una partícula no se puede observar directamente, y es importante comprender que cuando cambia la condición del electrón también lo hace su función de onda. Así, por ejemplo, la función de onda de un electrón libre es distinta de la función de onda de un electrón ligado en un átomo de hidrógeno.



Figura 12.19
Descripción clásica y mecánico-cuántica de un electrón en movimiento

En física clásica podemos conocer la posición de una partícula en cualquier momento de forma exacta, pero a escala microscópica (física cuántica), las propiedades ondulatorias de la partícula cobran importancia y solo nos podemos referir a la *probabilidad* de que una partícula esté en una posición dada en un momento dado.

Según la mecánica cuántica, una partícula no puede tener una trayectoria precisa, sino que solo podemos hablar de la probabilidad de encontrarla en un lugar determinado en un instante determinado. Podemos ver la función de onda de un electrón como una versión borrosa de su trayectoria (Figura 12.19). Cuanto más oscura es la zona sombreada, mayor es la probabilidad de encontrar un electrón en esa zona.

La función de onda del electrón ofrece un medio de representar su probabilidad, pero no directamente:

$|\psi(x, t)|^2$ representa el cuadrado del valor absoluto de la amplitud de la función de onda. Es una medida de la probabilidad de que un electrón se encuentre cerca de un punto x en un instante de tiempo t.

La probabilidad de encontrar una partícula a una distancia r de un punto de referencia en una unidad de volumen, V, se conoce como **densidad de probabilidad**, $P(r)$. Está relacionada con $|\psi|^2$ de la manera siguiente (esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*); ΔV es el pequeño volumen que se está considerando:

$$P(r) = |\psi|^2 \Delta V$$

Como ejemplo, consideremos la Figura 12.20, en la que se representa la variación de la densidad de probabilidad de un electrón con respecto a la distancia r desde el centro de un átomo de hidrógeno en su estado fundamental ($n = 1$). El máximo indica la distancia más probable del electrón respecto al núcleo, que es de unos $0{,}50 \times 10^{-10}$ m. Este es el lugar donde la densidad de probabilidad es mayor. No obstante, el punto esencial que debemos comprender es que el electrón *no* está localizado en una órbita precisa y que se puede encontrar en cualquier otra distancia (excepto en el núcleo).

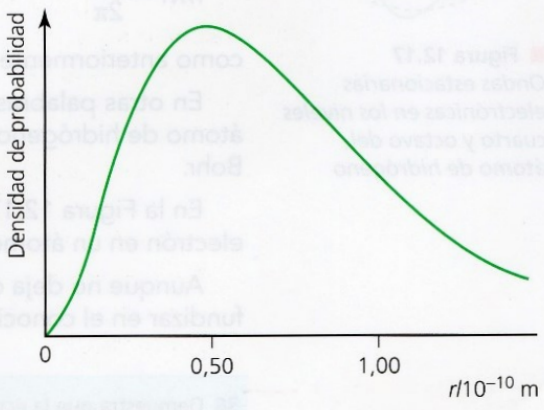


Figura 12.20
Densidad de probabilidad para un electrón en un átomo de hidrógeno

En niveles más avanzados, la función de onda se aplica en tres dimensiones y a menudo el electrón se representa como una «nube de electrones» (Figura 12.21) con una densidad de probabilidad variable. La distribución de la densidad electrónica se puede considerar como una fotografía del átomo obtenida con un tiempo de exposición elevado. El electrón tiene más posibilidades de encontrarse en aquellas posiciones en las que la densidad de probabilidad (representada mediante puntos) es mayor. Para el primer nivel energético principal ($n = 1$), el orbital toma la forma de una esfera borrosa.

Interpretación de los patrones de difracción y de interferencia

En capítulos anteriores de este libro hemos descrito los patrones de interferencia de la luz y de los electrones, y los hemos explicado en términos de superposición de ondas. Ahora deberíamos considerar cómo se pueden interpretar estos mismos patrones en términos de ondas de materia.

Cuando una onda electrónica individual (o un fotón) atraviesa una rendija, desconocemos su trayectoria exacta (solo conocemos su distribución de probabilidad), y únicamente emerge un patrón en la pantalla cuando se *detecta* un número significativo de estas ondas. Los puntos de la Figura 12.22 representan la llegada de electrones individuales que se han detectado en la pantalla.

Podemos describir las posiciones de un electrón individual (o de un fotón) con respecto a su fuente, a través de las rendijas, en el lugar donde es detectado como «en cualquier parte», aunque ciertamente lo encontraremos con mayor probabilidad en unos lugares que en otros (tal como describe su función de onda). Cuando llega a la pantalla, su función de onda cambia («se colapsa») y puede ser detectado. En muchas ocasiones se resume el comportamiento cuántico con la cita: «nada es real a menos que se observe».

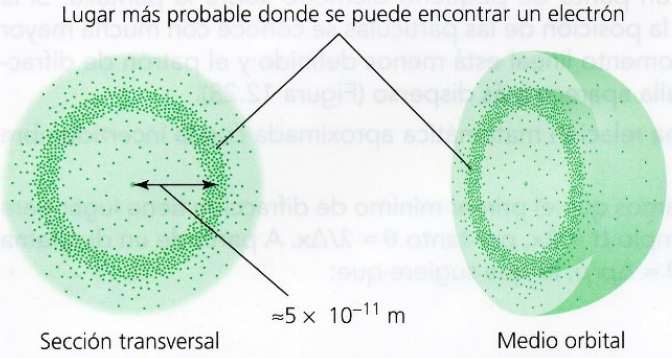


Figura 12.21
Nube de electrones para el primer orbital del átomo de hidrógeno

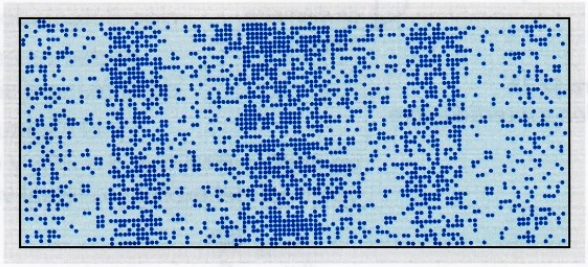


Figura 12.22
Distribución de los electrones que llegan a una pantalla en un patrón de interferencia (¡en este caso sería un haz con muy poca intensidad!)

Naturaleza de la ciencia

La naturaleza de la probabilidad

Existe una famosa cita de Einstein que dice: «Dios no juega a los dados», pero la naturaleza de la probabilidad asociada a la teoría cuántica es mucho más profunda que el lanzamiento de un dado o de una moneda al aire. En principio se podría predecir el modo en que cae el dado si se dispusiera de suficiente información sobre el propio dado y la mecánica de su lanzamiento. Pero no sucede lo mismo en la teoría cuántica: en mecánica cuántica, unas mismas condiciones iniciales pueden llevar a resultados muy distintos, por tanto, el futuro no está determinado por el pasado.

Principio de incertidumbre de Heisenberg

Como a escala cuántica las partículas tienen propiedades ondulatorias que hacen que sus posiciones se describan en términos de probabilidades, es imposible observar todas las propiedades de una partícula en un instante. Este concepto se clarifica mediante el **principio de incertidumbre de Heisenberg**, que enlaza pares de variables (como la posición y el momento lineal): cuanto mayor es la precisión con la que conocemos una de ellas, menor es la precisión con la que conocemos la otra. No podemos medir simultáneamente ambas propiedades con una precisión ilimitada.

Por ejemplo, en la vida diaria podemos observar frecuentemente que un coche se mueve con un determinado momento lineal cuando está situado en una determinada posición, pero no es posible tener esta certeza en el mundo cuántico.

Es importante remarcar que la *incertidumbre* en física atómica no tiene su origen en métodos experimentales o aparatos deficientes, sino que se trata de una característica fundamental de la física cuántica.

El principio de incertidumbre para la energía y el tiempo, y para la posición y el momento lineal

La incertidumbre en la posición, Δx, y la incertidumbre en el momento, Δp, de una partícula están ligadas por la ecuación:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Esta ecuación nos indica que cuanto mayor es la precisión con la que conocemos el momento lineal de una partícula (menor Δp), menor es la precisión con la que conocemos su posición (mayor Δx). Cuanto mayor es la precisión con la que conocemos la posición de una partícula, menor es la precisión con la que conocemos su momento lineal. Por este motivo, el momento lineal y la posición son *variables enlazadas* y se denominan **magnitudes conjugadas**. Si una de ellas es cero, la otra debe ser infinita, lo que se traduce en que si quisiéramos especificar la ubicación exacta de una partícula, su momento lineal tendría que ser infinito.

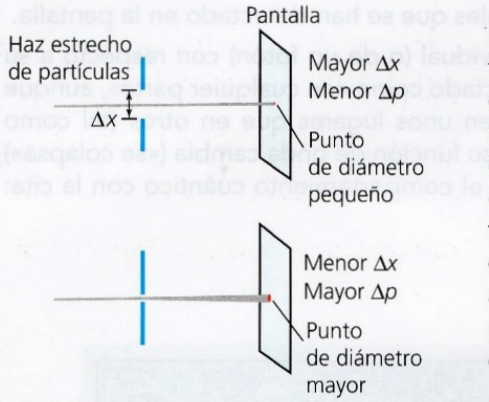


Figura 12.23
Difracción e incertidumbre

Para comprender mejor este principio es útil volver al ejemplo de la difracción de un haz de fotones (o de electrones) a través de una abertura pequeña: podemos interpretar la difracción en términos de la incertidumbre en la posición de las partículas cuando atraviesan la abertura. La observación nos indica que si la abertura es mucho mayor que la longitud de onda, la difracción es insignificante (Capítulos 4 y 9). En esas circunstancias, la incertidumbre en la posición es elevada (porque la abertura es relativamente grande), de modo que la incertidumbre en el momento lineal (vectorialmente, es decir, en rapidez, dirección y sentido) es pequeña, y las trayectorias de las partículas generan un punto de pequeño diámetro sobre la pantalla. Si la abertura es mucho menor, la posición de las partículas se conoce con mucha mayor precisión y por tanto su momento lineal está menos definido y el patrón de difracción detectado en la pantalla aparece más disperso (Figura 12.23).

Podemos establecer una relación matemática aproximada con la incertidumbre de la manera siguiente.

En el Capítulo 9 estudiamos que el primer mínimo de difracción tiene lugar para un ángulo θ tal que $\theta = \lambda/b$, y en este ejemplo $b = \Delta x$, por tanto $\theta = \lambda/\Delta x$. A partir de un diagrama vectorial del momento lineal vemos que $\theta = \Delta p/p$, lo que sugiere que:

$$\frac{\lambda}{\Delta x} \approx \frac{\Delta p}{p}$$

o

$$\Delta x \Delta p \approx p\lambda = h$$

Y esta relación concuerda totalmente con el principio de incertidumbre expresado de forma más precisa mediante la ecuación de la página anterior.

El principio de incertidumbre se puede relacionar con la *función de onda* de Schrödinger: cuanto mayor es la precisión con la que se conoce la longitud de onda de un electrón, mayor es la precisión con la que se determina su momento lineal ($p = h/\lambda$) y mayor es la incertidumbre en su posición. Por ejemplo, si la función de onda de un electrón libre fuera una función perfectamente sinusoidal, su longitud de onda y su momento lineal se conocerían con certidumbre, de manera que habría una incertidumbre infinita en su posición.

Ejemplos resueltos

7 Un electrón se mueve en línea recta con una velocidad constante ($1{,}30 \times 10^6$ m s^{-1}). La velocidad se puede medir con una precisión del 0,10%. ¿Cuál es la máxima precisión posible (mínima incertidumbre) en su posición si ambas (posición y velocidad) se miden simultáneamente?

$p = mv$

$p = (9{,}110 \times 10^{-31}) \times (1{,}30 \times 10^6) = 1{,}18 \times 10^{-24}\,\text{kg m s}^{-1}$

$\Delta p = 0{,}0010p = 1{,}18 \times 10^{-27}\,\text{kg m s}^{-1}$

$$\Delta x \geq \frac{h}{4\pi \times \Delta p} = \frac{6{,}63 \times 10^{-34}}{4 \times \pi \times 1{,}18 \times 10^{-27}}$$

$\Delta x_{min} = 4{,}45 \times 10^{-8}\,\text{m}$

La máxima precisión posible en la posición (mínima incertidumbre), $\Delta x = 44{,}5\,\text{nm}$.

8 Se mide la posición de un electrón con una precisión de $0{,}50 \times 10^{-10}$ m. Calcula la incertidumbre mínima asociada al momento lineal.

$$\Delta p \geq \frac{h}{4\pi \times \Delta x} = \frac{6{,}63 \times 10^{-34}}{4 \times \pi \times 0{,}50 \times 10^{-10}}$$

$\Delta p_{min} = 1{,}1 \times 10^{-24}\,\text{kg m s}^{-1}$

9 Supongamos que un electrón está confinado en el interior de un núcleo de diámetro 1×10^{-15} m. Utiliza el principio de incertidumbre para estimar la incertidumbre mínima asociada a **a** su momento y **b** su energía cinética. **c** Supón ahora que el electrón está en el interior de un núcleo de hidrógeno. Compara tu respuesta para **b** con la energía potencial eléctrica de un sistema protón-electrón separado por una distancia de $1 \times 10^{-15}\,\text{m}$.

a

$$\Delta p = \frac{h}{4\pi \times \Delta x} = \frac{6{,}63 \times 10^{-34}}{4 \times \pi \times 1 \times 10^{-15}}$$

$$\Delta p \approx 5{,}3 \times 10^{-20}\,\text{kg m s}^{-1}$$

b $\Delta E_k = \frac{\Delta p^2}{2m} = \frac{(5{,}3 \times 10^{-20})^2}{2 \times 9{,}1 \times 10^{-31}} = 1{,}5 \times 10^{-9}\,\text{J}$

c $E_p = \frac{ke^2}{r} = \frac{(8{,}99 \times 10^9)\,(1{,}6 \times 10^{-19})^2}{1 \times 10^{-15}} = 2 \times 10^{-13}\,\text{J}$

Este cálculo nos indica que si un electrón estuviera confinado en el interior de un núcleo, debería tener una energía cinética muchas veces superior a la energía mínima necesaria para vencer la atracción eléctrica y escapar (= energía potencial del sistema). En otras palabras, el principio de incertidumbre confirma que un electrón *no puede* existir en el interior del núcleo. Los electrones que se crean en el interior del núcleo en la desintegración radiactiva de partículas beta, son expulsados inmediatamente.

Las medidas del tiempo y de la energía son también variables enlazadas y se describen mediante el principio de incertidumbre energía-tiempo:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

ΔE representa la incertidumbre en la medida de la energía, mientras que t representa la incertidumbre en la medida del tiempo cuando se realizó la medida.

Esta ecuación nos dice que cuanto menor es el tiempo que se tarda en realizar una medida, mayor es la incertidumbre en la energía, y esta afirmación tiene importantes consecuencias (véase el Ejemplo resuelto 12).

Ejemplos resueltos

10 Un electrón asciende desde el estado fundamental de un átomo hasta un estado más energético, pero vuelve al cabo de 5×10^{-8} s. ¿Cuál es la incertidumbre mínima en la energía del electrón excitado?

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

$$\Delta E \times (5 \times 10^{-8}) \geq \frac{h}{4\pi} = 5{,}28 \times 10^{-35}$$

$$\Delta E \geq 1 \times 10^{-27}\,\text{J}\ (= 7 \times 10^{-6}\,\text{eV})$$

que representa un porcentaje muy pequeño de los niveles energéticos de los átomos.

11 La energía total de un electrón es 2 eV, pero necesitaría 5 eV para «escapar» del núcleo que lo atrae. Según la física clásica, el electrón no puede escapar porque no tiene suficiente energía, pero el principio de incertidumbre afirma que podría adquirir la energía adicional (3 eV) si el intervalo de tiempo fuera lo suficientemente corto. La incertidumbre en la energía puede ser grande si la incertidumbre en el tiempo es pequeña. Calcula el tiempo máximo para que el electrón pueda escapar.

$$\Delta E \Delta t = \frac{h}{4\pi}$$

$$(3 \times 1{,}6 \times 10^{-19}) \times \Delta t = \frac{h}{4\pi} = 5{,}28 \times 10^{-35}$$

$$\Delta t = 1 \times 10^{-16}\,\text{s}$$

Es posible que un electrón escape del átomo si el intervalo de tiempo es de 1×10^{-16} s como máximo. Esto significa que, como consecuencia del principio de incertidumbre, se puede desobedecer la ley clásica de conservación de la energía si el tiempo es lo suficientemente breve. Existen otros importantes ejemplos de este fenómeno entre los que se incluyen algunos aspectos de la desintegración radiactiva, la fusión nuclear y la existencia de partículas de intercambio (véase la sección siguiente).

39 Calcula la incertidumbre mínima asociada a la velocidad de un electrón que está en una órbita de radio $1{,}0 \times 10^{-10}$ m en la que la incertidumbre mínima asociada a la posición es del 1% del radio.

40 Una masa de 40,00 g se mueve a una velocidad de 45,00 m s^{-1}. Calcula la incertidumbre mínima asociada a la posición sabiendo que la velocidad se puede calcular con una precisión del 2%.

41 El tiempo de vida de un neutrón libre es 15 minutos. ¿Cuál es la incertidumbre asociada a su energía (en eV)?

42 Utiliza el principio de incertidumbre para estimar los valores del momento lineal y de la energía cinética (eV) de un electrón confinado en algún lugar en el interior de un átomo de radio 1×10^{-10} m.

43 En la Figura 12.24 se representa el intercambio de un bosón W (masa 80,4 GeV c^{-2}) entre dos quarks. *R* representa la distancia entre los quarks en el momento del intercambio.

a ¿A qué energía (J) equivale la masa del bosón?

b Si suponemos que la partícula se mueve a una velocidad cercana a la de la luz, *c*, podemos asumir que la interacción dura *R*/*c* (distancia/velocidad). Utiliza la ecuación de la incertidumbre para estimar el valor máximo de *R*.

c Explica por qué la fuerza nuclear débil tiene un alcance tan corto.

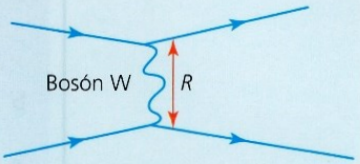


Figura 12.24

44 Uno de los niveles energéticos del hidrógeno se encuentra a 12,8 eV por encima del estado fundamental. Utiliza el principio de incertidumbre para estimar el orden de magnitud del tiempo que puede permanecer el electrón en este estado excitado.

45 Busca información sobre el experimento del «gato en la caja» de Schrödinger y explica su conexión con la teoría cuántica.

Efecto túnel, barrera de potencial y factores que afectan a la probabilidad del efecto túnel

Una de las implicaciones más importantes e interesantes de la mecánica cuántica es que las partículas pueden hacer cosas que se considerarían imposibles según los principios de la física clásica. Consideremos la Figura 12.25, en la que se representa una partícula de energía, *E*, atrapada entre dos *barreras* rectangulares (por simplicidad) de energía, E_B. La partícula parece estar atrapada porque $E < E_B$. Podríamos establecer una analogía gravitatoria consistente en una pelota atrapada entre dos colinas sin la suficiente energía cinética para convertirla en energía potencial y así poder sobrepasar la cima de la colina. El ejemplo más simple que podemos plantear en física atómica sería un electrón en un átomo de hidrógeno sin la suficiente energía para poder «escapar» de la atracción eléctrica del protón.

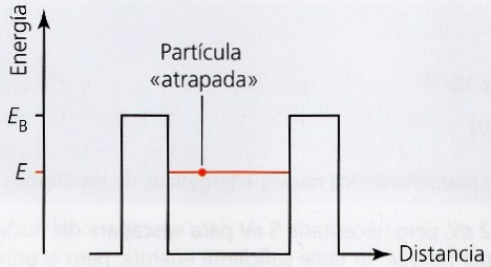


Figura 12.25
Una partícula atrapada entre dos barreras

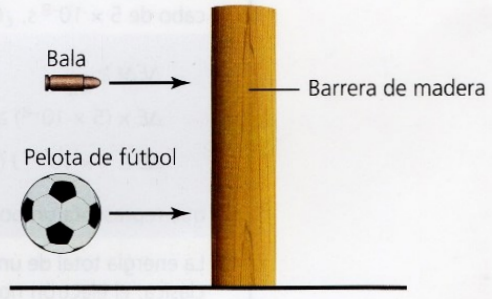


Figura 12.26
Una bala y una pelota de fútbol impactando horizontalmente contra una barrera de madera

Vamos a considerar ahora qué podría ocurrir cuando un objeto se encuentra con una barrera. En la Figura 12.26 se representa una situación de física clásica en la que una bala y una pelota de fútbol impactan horizontalmente contra una barrera de madera. En física clásica, ni una ni otra pueden atravesar la gruesa barrera, aunque si la bala viaja lo suficientemente rápido, existe una posibilidad de que penetre en el interior de la barrera, aunque esto sucedería solo si hiciera físicamente un agujero permanente en su interior.

Barreras de potencial

Consideremos una partícula constreñida por una de las fuerzas fundamentales. Como mencionamos anteriormente, el ejemplo más simple de la física atómica sería el de un electrón atómico sin la suficiente energía cinética para vencer la atracción del núcleo y así poder «escapar». En este caso la «barrera» es una barrera de energía potencial eléctrica porque el electrón necesita ganar la suficiente energía potencial para escapar. Con el objeto de generalizar la discusión, es habitual hablar de *barreras de potencial* (en este ejemplo, potencial eléctrico = energía/carga) en lugar de barreras de energía potencial. Las analogías gravitatorias son útiles en este tipo de discusión y también se suelen utilizar los términos «colina» y «pozo» de potencial en las descripciones de las barreras de potencial.

Efecto túnel cuántico

En la Figura 12.27 (parte superior) se representa un electrón acercándose a una barrera de potencial. Una vez más se ha simplificado la situación mediante el uso de una representación rectangular para la barrera (que no ofrece indicación de la variación del potencial con la distancia). En la parte inferior de la figura se representa la densidad de probabilidad del electrón, que aparece a *ambos* lados de la barrera. La naturaleza ondulatoria del electrón es la causa de que exista una clara probabilidad de detectarlo al otro lado de la barrera. En otras palabras, algunos electrones «excavan un túnel» a través de la barrera (y por eso se habla de «efecto túnel»).

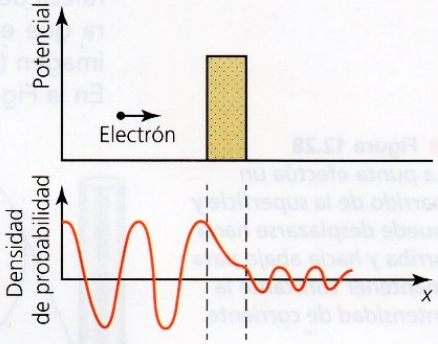


Figura 12.27
Continuidad de la función de onda a través de la barrera (la forma de onda es solo aproximada)

- Cuando los electrones impactan contra la barrera, la mayoría son reflejados. Las ondas de materia incidentes y reflejadas interfieren y se genera un patrón de ondas estacionarias (que da lugar a unos niveles energéticos específicos).
- La función de onda y la densidad de probabilidad en las fronteras de la barrera de potencial son continuas.
- La densidad de probabilidad decrece exponencialmente en la barrera rectangular.
- Existe una pequeña probabilidad de detectar un electrón fuera de la barrera rectangular.

Probabilidad del efecto túnel

El número de partículas que atraviesan una barrera de potencial determinada por efecto túnel depende de la probabilidad con la que una partícula que se acerca a la barrera penetra en el otro lado de esta. Esta probabilidad depende de los factores siguientes:

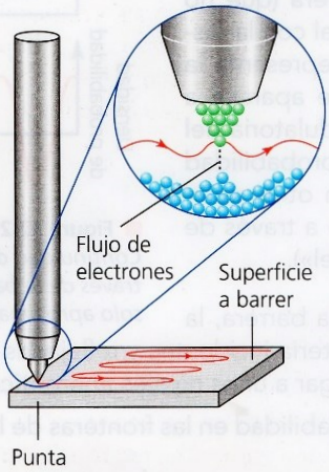
- masa de la partícula
- grosor de la barrera
- «altura» de la barrera de potencial
- energía transportada por la partícula.

La física atómica y nuclear lidia con un número enormemente elevado de partículas e interacciones. Esto significa que, aunque la probabilidad de que ocurra una determinada interacción (como un efecto túnel cuántico) sea extraordinariamente pequeña, sí puede ocurrir cuando el número de interacciones es muy significativo. Para que nos hagamos una idea, se dice que las posibilidades de que nos mate un rayo son muy pequeñas (en promedio aproximadamente una entre 300 000 a lo largo de un año), pero esta cifra sugiere que en todo el mundo cada año son víctimas de un rayo unas 25 000 personas.

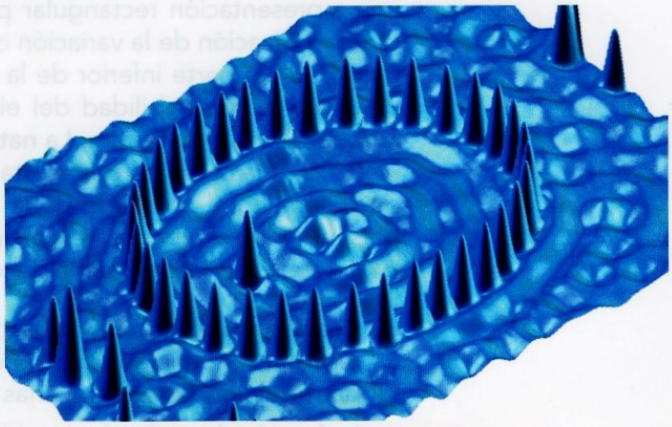
Ejemplos de efecto túnel cuántico

- *Ionización*: algunos electrones pueden escapar de la atracción de un núcleo sin tener que adquirir toda la energía de ionización necesaria para ello.
- *Desintegración alfa*: cuando se crean partículas alfa en las desintegraciones nucleares que tienen lugar en los núcleos de átomos inestables, los cálculos predicen que no tienen suficiente energía para vencer las fuerzas nucleares fuertes; sin embargo, algunas consiguen escapar y convertirse en radiación nuclear.
- *Fusión solar*: algunos núcleos de hidrógeno consiguen fusionarse teniendo menor energía cinética que la que sugieren los cálculos. Esto significa que se puede producir fusión nuclear a temperaturas inferiores a las predichas. Por ejemplo, la temperatura absoluta en el núcleo del Sol es del orden de 1 000 veces inferior a la necesaria, según los cálculos, para que se produzca la fusión nuclear.
- *Microscopio de efecto túnel* (*STM*, por sus siglas en inglés) –véase la Figura 12.28. La punta, muy afilada, se acerca a la superficie a examinar y se aplica un voltaje entre ambas para proporcionar una «barrera» para los electrones que se desplazan desde la superficie a la punta. Algunos electrones experimentan efecto túnel y atraviesan la barrera, de modo que se puede medir una pequeña intensidad de corriente. La magnitud de la corriente depende mucho de la natu-

raleza de la distribución electrónica en el interior de la superficie y alrededor de esta, de manera que el desplazamiento de la punta sobre la superficie se puede utilizar para obtener una imagen (se efectúa un barrido). Este tipo de microscopio puede resolver átomos individuales. En la Figura 12.29 se muestra una imagen obtenida con un STM.



■ **Figura 12.28**
La punta efectúa un barrido de la superficie y puede desplazarse hacia arriba y hacia abajo para mantener constante la intensidad de corriente



■ **Figura 12.29**
Imagen de una superficie de cobre obtenida mediante un microscopio de efecto túnel

La resolución de los diversos tipos de microscopios está limitada por la longitud de onda de la radiación que usan (recordemos el criterio de Rayleigh, Capítulo 9). Como la longitud de onda de los electrones es mucho más corta que la de la luz, pueden ofrecer una resolución mucho mayor.

46 Vuelve a dibujar la Figura 12.27 para representar una barrera más gruesa.

47 Utiliza el principio de incertidumbre de Heisenberg para estimar el orden de magnitud del tiempo máximo para que un electrón escape de un átomo de hidrógeno por efecto túnel.

48 Busca en Internet más imágenes obtenidas con microscopios de efecto túnel.

49 Vuelve a dibujar la Figura 12.25 para representar de una forma más realista el pozo de potencial (o de energía potencial) para un electrón en un átomo de hidrógeno.

Enlace con la teoría del conocimiento

Los avances tecnológicos pueden propiciar nuevas formas de pensamiento

El carácter dual de la materia y el efecto túnel son casos en los que se violan las leyes de la física clásica. ¿Hasta qué punto los avances tecnológicos propician los ***cambios de paradigma*** *en la ciencia?*

Tenemos otro ejemplo en la invención y el uso del telescopio, que supusieron un factor esencial en la introducción de un modelo heliocéntrico del universo y las teorías subsiguientes. Los descubrimientos significativos que surgen de nuevos inventos o avances tecnológicos a menudo preceden al establecimiento de nuevas teorías.

12.2 Física nuclear

El carácter discreto de las cantidades que aparecen en el ámbito atómico continúa dándose también en el ámbito nuclear

En esta sección profundizaremos en el tamaño y la estructura nuclear, comenzando por analizar con más detalle los resultados de los experimentos de dispersión nuclear de Rutherford que vimos en el Capítulo 7 (experimentos de Geiger y Marsden).

■ Dispersión de Rutherford y radio nuclear

En la gráfica de la Figura 12.30 se representan los resultados característicos obtenidos en este experimento. La observación más inesperada consistió en que algunas partículas alfa eran dispersadas con ángulos grandes. De hecho, cerca de una de cada 10 000 partículas alfa que incidían en la lámina de oro eran desviadas con un ángulo mayor de 90°.

Para que una partícula alfa sea dispersada en línea recta hacia atrás (con muy poca pérdida de energía cinética), debe haber «colisionado» con una masa mucho más grande (véanse las colisiones elásticas en el Capítulo 2). Como la mayoría de partículas alfa *no* son desviadas, la masa de cada átomo debe estar concentrada en un centro de tamaño muy pequeño (el núcleo), de manera que la mayoría de partículas no colisionan con él. Rutherford se dio cuenta más adelante de que el *patrón* de dispersión de las partículas alfa solo se podía explicar mediante la acción de repulsiones

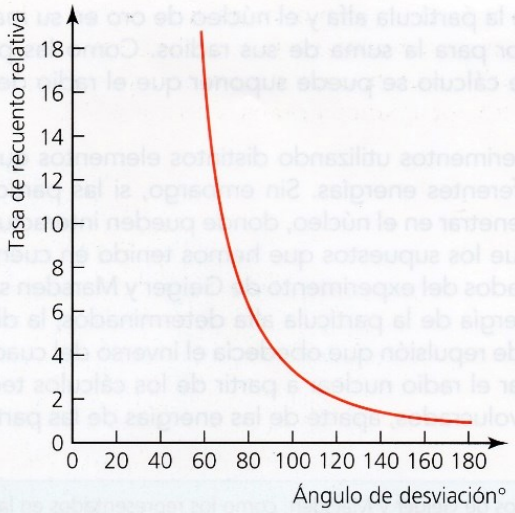


Figura 12.30
Tasa de dispersión de las partículas alfa a distintos ángulos

eléctricas de gran magnitud entre las partículas alfa positivas y los núcleos diminutos cargados positivamente. Propuso que cada núcleo tiene una carga mucho mayor que la de la partícula alfa y que está concentrada efectivamente en un *punto* en el centro del átomo. El módulo de las fuerzas, F, entre dos cargas, q_1 y q_2, se describe mediante la ley de Coulomb (Capítulo 5), donde r es la distancia entre ambas cargas:

$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Rutherford pudo estimar el radio de un núcleo de oro mediante el cálculo de la máxima aproximación de la partícula alfa al núcleo durante la interacción. Cuando la partícula alfa, que se mueve directamente hacia el núcleo, se encuentra a la menor distancia de este, deja de moverse, de manera que toda su energía cinética original se transforma en energía potencial eléctrica. Es como si entre la partícula alfa y el núcleo de oro se estuviera encogiendo un «muelle invisible» a medida que se acercan. Véase la Figura 12.31.

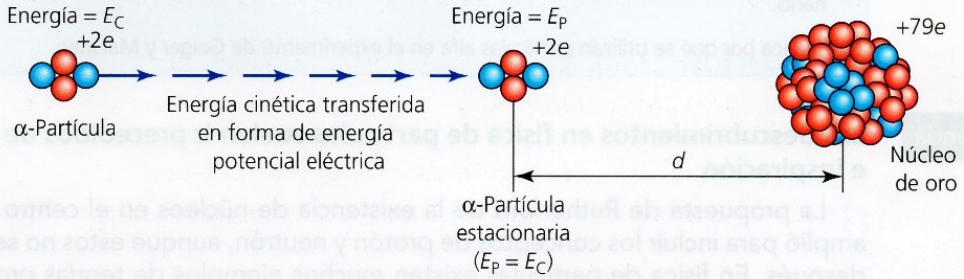


Figura 12.31
Cuando se produce la máxima aproximación en una colisión frontal, la energía potencial eléctrica almacenada en el campo eléctrico es igual a la energía cinética inicial de la partícula alfa, $E_P = E_C$

La ecuación para la energía potencial eléctrica (E_P) depende de la separación, r, de las dos cargas (véase el Capítulo 10; también figura en el *Apéndice de datos de Física*):

$$E_P = \frac{kq_1q_2}{r}$$

En el caso de la partícula alfa, a la distancia correspondiente a la máxima aproximación al núcleo, toda su energía cinética, E_C, se habrá transformado en energía potencial eléctrica, $E_P = E_C$, por tanto:

$$E_P = E_C = \frac{kq_1q_2}{r}$$

La carga de la partícula alfa es $+2e$ y la carga del núcleo es $+Ze$, ($Z = 79$ para el oro), de manera que la energía cinética de las partículas alfa es conocida (y es la misma para todas), por tanto se puede calcular r de la manera siguiente:

$$r = \frac{kq_1q_2}{E_C} = \frac{k(2e \times Ze)}{E_C}$$

Si el núcleo diana es un núcleo de oro y la energía cinética de las partículas alfa incidentes es 4,0 MeV (característica de las partículas alfa), la distancia correspondiente a la máxima aproximación es:

$$r = \frac{(8{,}99 \times 10^9) \times (2 \times 79) \times (1{,}6 \times 10^{-19})^2}{(4{,}0 \times 10^6) \times (1{,}6 \times 10^{-19})}$$

$$r = 5{,}7 \times 10^{-14}\,\text{m}$$

Esta es la separación entre la partícula alfa y el núcleo de oro en su *máxima aproximación* y nos proporciona un *límite superior* para la suma de sus radios. Como las partículas alfa transportan tanta energía, a partir de este cálculo se puede suponer que el radio de un núcleo de oro es del orden de 10^{-14} m.

Se pueden repetir los experimentos utilizando distintos elementos que proporcionan el núcleo diana y partículas alfa con diferentes energías. Sin embargo, si las partículas alfa son mucho más energéticas pueden llegar a penetrar en el núcleo, donde pueden interactuar también con las fuerzas nucleares fuertes, de modo que los supuestos que hemos tenido en cuenta anteriormente pueden dejar de ser válidos. Los resultados del experimento de Geiger y Marsden se utilizaron para confirmar que, para un núcleo y una energía de la partícula alfa determinados, la dispersión de las partículas estaba dominada por una ley de repulsión que obedecía el inverso del cuadrado de la distancia. Bajo esta hipótesis, se pudo estimar el radio nuclear a partir de los cálculos teóricos anteriores. (No hay otros datos experimentales involucrados, aparte de las energías de las partículas alfa).

50 Los resultados de los experimentos de Geiger y Marsden, como los representados en la Figura 12.31, indican que un átomo tiene un núcleo de pequeño tamaño cargado positivamente. Explica cómo se llega a esta conclusión.

51 Determina la distancia más cercana a la que una partícula alfa de energía 1,37 MeV se puede aproximar a:
a un núcleo de oro
b un núcleo de cobre.

El número atómico del cobre es 29.

52 Calcula la velocidad a la que una partícula alfa (masa $6{,}64 \times 10^{-27}$ kg) debería viajar hacia el núcleo de un átomo de oro (carga +79e) para acercarse a menos de $2{,}7 \times 10^{-14}$ m de este. Supón que el núcleo de oro permanece estacionario.

53 Explica por qué se utilizan partículas alfa en el experimento de Geiger y Marsden.

Naturaleza de la ciencia

Los descubrimientos en física de partículas suelen ir precedidos de avances teóricos e inspiración

La propuesta de Rutherford de la existencia de núcleos en el centro de los átomos pronto se amplió para incluir los conceptos de protón y neutrón, aunque estos no se descubrieron hasta años después. En física de partículas existen muchos ejemplos de teorías propuestas mucho antes de que la pericia experimental se haya desarrollado lo suficiente como para recoger pruebas que respalden la teoría. Otros ejemplos son las antipartículas y el bosón de Higgs, cuya existencia se confirmó al cabo de muchos años de ser propuestos por primera vez.

Dispersión de electrones debida a los núcleos

Hemos utilizado la ley de Coulomb para *estimar* los tamaños de los radios nucleares a partir de experimentos de dispersión de partículas alfa, pero necesitamos pruebas directas. La detección de lo que les sucede a rayos de partículas de alta energía (de propiedades conocidas, como las partículas alfa) cuando son dirigidos a átomos y núcleos en dianas es una estrategia evidente. No obstante, si las partículas contienen hadrones (como es el caso de las partículas alfa), sus interacciones con los núcleos se complican si experimentan fuerzas nucleares fuertes cuando están muy cerca del núcleo o bien penetran en su interior (Figura 12.32).

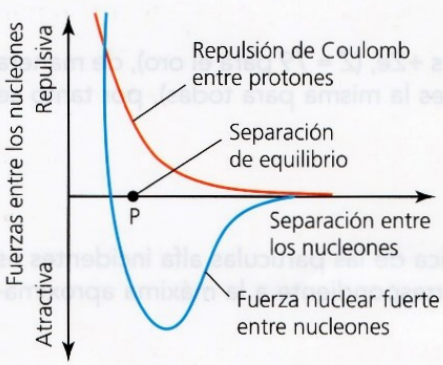


Figura 12.32
Comparación entre la fuerza de repulsión de Coulomb y la fuerza nuclear fuerte

Los electrones son leptones y por tanto *no* experimentan fuerzas nucleares fuertes (aunque sí pueden seguir experimentando fuerzas electromagnéticas en el interior del núcleo). Además, los haces de electrones de alta energía son fáciles de generar y de controlar, lo que significa que son una buena elección para investigar los núcleos. Al principio de este capítulo vimos que las propiedades ondulatorias de los electrones se traducen en que pueden ser difractados por átomos y por el espaciado entre estos, que habitualmente es de unos 10^{-10} m. (En el Ejemplo resuelto 5 se vio que un voltaje de aceleración de 1000 V genera electrones de longitud de onda $0{,}55 \times 10^{-10}$ m). Recordemos que los efectos de difracción son más significativos si la longitud de onda y el objeto que produce la difracción son aproximadamente del mismo tamaño. Si se emplean voltajes de aceleración mucho mayores se producen electrones con longitudes de onda menores, incluso de 10^{-15} m, que son adecuados para ser difractados por objetos de ese tamaño, como los núcleos. Debemos mencionar que cuando las velocidades son muy elevadas y se aproximan a la de la luz, los efectos de la relatividad comienzan a ser importantes (Opción A: Relatividad) y las masas de los electrones acelerados aumentan, así como sus velocidades.

Podemos utilizar la ecuación $E = hf = hc/\lambda$ para determinar la energía de los electrones que produce la longitud de onda de De Broglie requerida, por ejemplo, 5×10^{-15} m:

$$E = (6{,}63 \times 10^{-34}) \times \frac{3{,}00 \times 10^{8}}{5 \times 10^{-15}} \approx 4 \times 10^{-11}\,\text{J}$$

o aproximadamente 2×10^{8} eV (200 MeV).

Es decir, se necesita un voltaje de aceleración del orden de 200 MV. (Los electrones de haces generados por voltajes de aceleración incluso mayores pueden penetrar profundamente en el interior del núcleo y proporcionar información sobre la estructura de los nucleones).

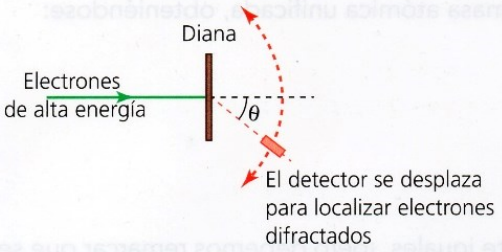


Figura 12.33
Uso de la dispersión de electrones de alta energía para estudiar núcleos

En la Figura 12.33 se representa una versión simplificada de la disposición experimental en la que no se incluye el aparato diseñado para acelerar los electrones hasta 200 MV o más.

La difracción de electrones debida a un núcleo es similar en principio a la difracción de fotones de luz debida a una rendija.

En el Capítulo 9 vimos que el primer *mínimo* de difracción para la luz de longitud de onda λ que atravesaba una rendija de anchura b se producía a un ángulo tal que sen $\theta = \lambda/b$. (Como los ángulos relativos a la luz eran muy pequeños, se podía emplear la aproximación sen $\theta = \theta$, de modo que la ecuación anterior se convertía en $\theta = \lambda/b$). De forma análoga, para la difracción de electrones, el primer mínimo de difracción se produce a un ángulo tal que:

$$\text{sen}\,\theta \approx \frac{\lambda}{D}$$

donde D es la anchura del objeto que produce la difracción, el diámetro del núcleo. Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

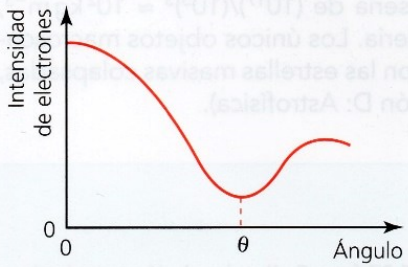


Figura 12.34
Variación de la intensidad de electrones con el ángulo

Cuando el detector representado en la Figura 12.33 rota desde su posición central, la intensidad del haz de electrones disminuye, y cuando alcanza un mínimo de difracción, vuelve a aumentar. Véase la Figura 12.34.

54 El diámetro nuclear del átomo de carbono es $2{,}75 \times 10^{-15}$ m. ¿A qué ángulo se detecta el primer mínimo de difracción cuando el núcleo de carbono difracta electrones con una longitud de onda de De Broglie de $1{,}2 \times 10^{-15}$ m?

55 Sabiendo que el máximo valor posible de sen θ es 1, ¿cuál es la mínima energía que debe tener un electrón (en MeV) para que se pueda observar un mínimo de difracción debido a un núcleo de cobre de diámetro $4{,}8 \times 10^{-15}$ m?

56 Considera la Figura 12.32. Explica por qué se produce la separación de equilibrio en el punto P.

Densidad nuclear

Si suponemos que, para una separación dada, la fuerza nuclear fuerte actúa por igual sobre todos los nucleones, de manera que están distribuidos de forma compacta en el núcleo, es razonable proponer que el volumen de un núcleo, V, sea proporcional al número de nucleones, A.

$$V \propto A$$

Si suponemos que el núcleo es aproximadamente esférico, su volumen, $V = \frac{4}{3}\pi R^3$, es proporcional a su radio, R, al cubo:

$$R^3 \propto A$$

Y por tanto:

$$R \propto A^{1/3}$$

Esta relación se confirma mediante experimentos de dispersión de electrones.

Introduciendo una constante de proporcionalidad:

$$R = R_0 A^{1/3}$$

Esta ecuación para el radio nuclear figura en el *Apéndice de datos de Física*. La constante R_0 se denomina **radio de Fermi** y equivale al radio de un núcleo con un único protón ($A = 1$). Los experimentos de difracción de electrones han permitido determinar su valor, que es $1{,}2 \times 10^{-15}$ m (= 1,2 fm), y que figura en el *Apéndice de datos de Física*.

Podemos utilizar la relación $\rho = m/V$ para estimar la **densidad nuclear**. La masa de un núcleo es aproximadamente igual a Au, donde u es la unidad de masa atómica unificada, obteniéndose:

$$\rho = \frac{Au}{\frac{4}{3}\pi A R_0^3} = \frac{3u}{4\pi R_0^3}$$

$$\rho = \frac{3 \times (1{,}661 \times 10^{-27})}{4\pi \times (1{,}2 \times 10^{-15})^3} \approx 2 \times 10^{17}\,\text{kg m}^{-3}$$

Todas las densidades nucleares son aproximadamente iguales, ¡pero debemos remarcar que se trata de una densidad extremadamente grande!

Si consideramos la masa de los electrones atómicos despreciable en comparación con la de los nucleones, y que el radio de un átomo es por lo general 10^5 veces mayor que el de un núcleo, entonces el orden de magnitud de la densidad de un átomo sería de $(10^{17})/(10^5)^3 \approx 10^2\,\text{kg m}^{-3}$, comparable a las observaciones cotidianas de densidad de materia. Los únicos objetos macroscópicos con densidades comparables a las densidades nucleares son las estrellas masivas colapsadas, conocidas como *estrellas de neutrones* y *agujeros negros* (Opción D: Astrofísica).

57 Estima el radio de:
- **a** un núcleo de oro (A = 197)
- **b** un núcleo de oxígeno (A = 16)
- **c** La medida experimental del radio de un núcleo de oro-197 da el valor 6,87 fm. ¿Cuál es la relación con el valor calculado en **a**?

58 Estima un valor para la fracción siguiente: radio del mayor núcleo posible respecto al radio del menor núcleo posible.

59 Se considera que el oro es un elemento denso. Estima qué fracción del volumen de un anillo de oro está verdaderamente ocupado por partículas. (Densidad del oro = 19 300 kg m^{-3})

60 La masa de la Tierra es $6{,}0 \times 10^{24}$ kg. Estima cuál sería el radio de una estrella de neutrones que tuviera la misma masa que la Tierra.

61 Explica por qué la masa de un núcleo es «*aproximadamente* igual a *Au*».

Niveles de energía nucleares

Como el átomo, el núcleo es un sistema cuántico y tiene niveles de energía discretos (individuales y separados).

La observación de que las energías de las partículas alfa y los rayos gamma son discretas ofrece una indiscutible evidencia experimental de la existencia de niveles energéticos nucleares. (A diferencia de las desintegraciones beta, en las que los electrones o los positrones emitidos tienen un espectro continuo de energías).

Las energías de las partículas alfa son discretas

Durante cada desintegración alfa se expulsa una única partícula alfa procedente de un núcleo inestable y de mayor tamaño. La partícula alfa, de menor tamaño, adquiere la mayor velocidad y el núcleo se desplaza hacia atrás (retrocede) a una velocidad menor, conservándose el momento lineal. En la desintegración alfa la energía se libera en forma de energía cinética de la partícula alfa y del núcleo en retroceso. La mayor parte de la energía la transporta la partícula alfa.

Las desintegraciones radiactivas de un radionúclido determinado siempre producen los mismos productos derivados, y las energías discretas de las partículas alfa emitidas por los núcleos de los mismos radionúclidos por lo general son idénticas. Sin embargo, algunos radionúclidos emiten partículas alfa con diversas energías distintas porque el producto derivado puede encontrarse en un *estado excitado* discreto entre varios posibles. En la Figura 12.35 se representa la emisión de partículas alfa con cinco energías diferentes correspondiente a la desintegración del americio-241 en neptunio-239, en la que este último tiene diversos niveles energéticos nucleares.

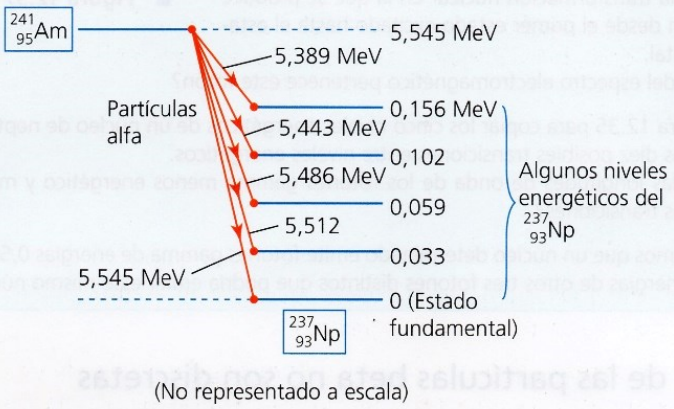


Figura 12.35
Energías de las partículas alfa emitidas por el americio-241

La desintegración radiactiva del mismo radionúclido siempre produce una o más de una partícula alfa con la misma energía discreta. Este hecho lo predice la ley de conservación del momento, porque las *dos* partículas involucradas siempre se deben desplazar en sentidos contrarios.

Las energías de los rayos gamma son discretas

El estudio de las emisiones de rayos gamma procedentes de núcleos radiactivos también ofrece pruebas de la existencia de niveles energéticos nucleares. En estas emisiones no varía ni el número de protones ni el número de neutrones del núcleo, pero se extrae energía del núcleo en forma de rayos gamma (fotones).

Las energías de los rayos gamma son discretas y únicas para un núclido concreto, lo que sugiere que los rayos gamma se emiten como resultado de **transiciones nucleares** desde un *estado excitado* con un nivel de energía más alto hasta un estado con energía más baja, de manera similar a las transiciones electrónicas atómicas (Capítulo 7). Tras la emisión de partículas alfa o partículas beta, los núcleos acostumbran a quedarse en estados excitados, tal como se representa en la Figura 12.35.

En la Figura 12.36 se representa otro ejemplo, esta vez más simple. Tras la desintegración del carbono-15 mediante emisión beta, algunos de los núcleos hijos de nitrógeno-15 se quedan en un estado excitado. Estos núcleos excitados emiten rayos gamma de una frecuencia determinada, y por tanto una energía determinada, para alcanzar el nivel energético más bajo (el estado fundamental).

Los fotones emitidos por los núcleos radiactivos transportan más energía (y, por tanto, tienen mayores frecuencias) que los fotones emitidos como resultado de transiciones en las que están involucrados electrones. Esto significa que los cambios energéticos asociados a los procesos nucleares son mucho más grandes que los asociados a transiciones electrónicas.

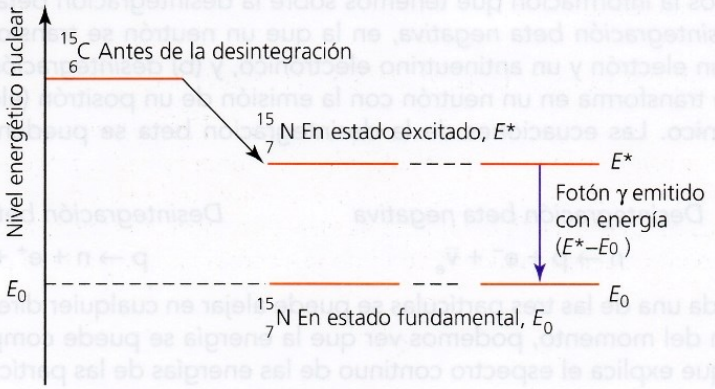


Figura 12.36
Los rayos gamma emitidos cuando los núcleos de nitrógeno-15 caen desde un estado excitado al estado fundamental tienen una frecuencia característica

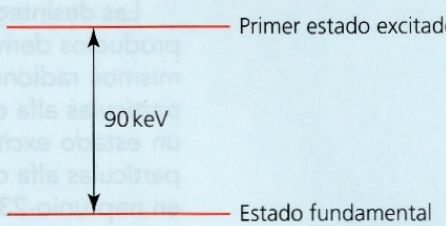
62 Argumenta por qué las medidas experimentales de las energías de las partículas alfa y de los rayos gamma sugieren la existencia de niveles energéticos nucleares discretos.

63 En la Figura 12.37 se representan los dos niveles energéticos inferiores del núcleo de un átomo pesado.

a ¿Cómo es la magnitud de las energías nucleares en comparación con la de las energías electrónicas?

b Calcula la longitud de onda de la radiación electromagnética emitida en una transformación nuclear en la que se produce una transición desde el primer estado excitado hasta el estado fundamental.

c ¿A qué zona del espectro electromagnético pertenece este fotón?



■ **Figura 12.37**

64 **a** Utiliza la Figura 12.35 para copiar los cinco niveles energéticos de un núcleo de neptunio-237. Dibuja flechas para representar las diez posibles transiciones entre niveles energéticos.

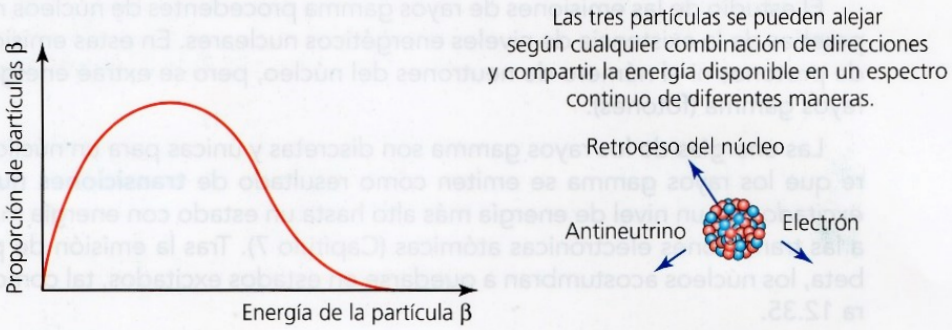
b ¿Cuáles son las longitudes de onda de los fotones gamma menos energético y más energético que se pueden emitir en estas transiciones?

65 Supón que sabemos que un núcleo determinado emite fotones gamma de energías 0,58 MeV, 0,39 MeV y 0,31 MeV. Determina las energías de otros tres fotones distintos que podría emitir este mismo núcleo.

Las energías de las partículas beta no son discretas

Si en la emisión de partículas beta solo estuvieran involucrados los núcleos y las partículas beta, todas las partículas emitidas por un radionúclido concreto deberían tener la misma energía cinética, de forma similar a lo que sucede en la emisión de partículas alfa. Sin embargo, las medidas experimentales indican que aunque la energía cinética *máxima* de las partículas beta es característica de la fuente beta, las partículas son emitidas con un *espectro continuo* de energías cinéticas (Figura 12.38).

■ **Figura 12.38**
Espectro de energía característico de una desintegración radiactiva



Esta inesperada observación se registró por primera vez en 1928 y en un primer momento podría haber sugerido que la energía y el momento podrían no conservarse. Sin embargo, el físico austríaco Wolfgang Pauli propuso en 1933 la hipótesis de la existencia de otra partícula asociada también a la desintegración beta y todavía no detectada. Se supuso que la hipotética partícula debía ser neutra (de otro modo no se conservaría la carga eléctrica) y debía tener muy poca masa o ninguna (de otro modo la curva energética de las partículas beta tendría otra forma). Esta nueva partícula recibió el nombre de **neutrino** (y su antipartícula el de **antineutrino**). La poca masa de esta partícula y su débil interacción con la materia postergaron la obtención de pruebas experimentales de su existencia hasta la década de 1950.

Repasemos la información que tenemos sobre la desintegración beta (Capítulo 7): existen dos tipos: (a) *desintegración beta negativa*, en la que un neutrón se transforma en un protón con la emisión de un electrón y un antineutrino electrónico, y (b) *desintegración beta positiva*, en la que un protón se transforma en un neutrón con la emisión de un positrón (electrón positivo) y un neutrino electrónico. Las ecuaciones de la desintegración beta se pueden escribir ahora de forma completa:

Desintegración beta negativa

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Desintegración beta positiva

$$p \rightarrow n + e^+ + \bar{\nu}_e$$

Como cada una de las tres partículas se puede alejar en cualquier dirección, aplicando la ley de conservación del momento, podemos ver que la energía se puede compartir siguiendo cualquier relación, lo que explica el espectro continuo de las energías de las partículas beta.

El neutrino

Como ya estudiamos en el Capítulo 7, los neutrinos (y sus antipartículas) son partículas elementales. Existen tres clases de neutrinos, cada una de ellas asociada respectivamente a un electrón, un muon o una partícula tau. Los neutrinos no tienen carga, su masa es muy pequeña y viajan a velocidades cercanas a la de la luz. En la actualidad se cree que pueden ser el segundo tipo más frecuente de partícula en el universo (después de los fotones). Se estima que cada segundo más de 10^{12} neutrinos atraviesan una uña, y que la mayoría son emitidos en reacciones nucleares de fusión que tienen lugar en el Sol. Por lo general atraviesan la Tierra sin que prácticamente les afecte.

La detección y las propiedades de los neutrinos se están convirtiendo en un campo de investigación en física cada vez más importante. Se espera que un conocimiento más profundo de los neutrinos aumente a su vez nuestro conocimiento de temas como el origen del universo, el cociente materia/antimateria y las propiedades de la «materia oscura» del universo.

Puede resultar sorprendente que sepamos tan poco sobre una partícula tan frecuente, pero sus propiedades y su poder de penetración asociado hacen que sean muy difíciles de detectar. La probabilidad de que interaccionen con la materia (en forma de partículas subatómicas) es extraordinariamente pequeña, aunque finita. Esta probabilidad se puede aumentar mediante el uso de grandes cámaras de detección que contienen gran cantidad de materia densa. La mejor ubicación para estos experimentos es en el subsuelo y/o en lugares remotos libres de influencias externas o del paso de partículas menos penetrantes. Véase la Figura 12.39.

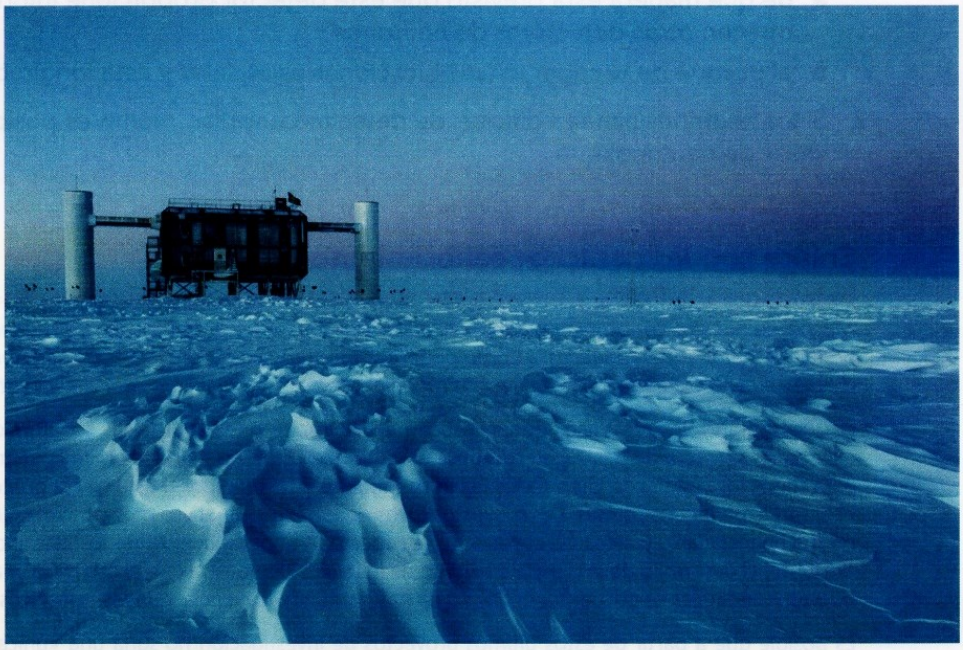


Figura 12.39
Construcción en la parte superior del detector de neutrinos «cubo de hielo», ubicado a mucha profundidad cerca del Polo Sur

Naturaleza de la ciencia

Potencia de cálculo actual: análisis de enormes cantidades de datos

Todos los experimentos de física de partículas y de física nuclear requieren el uso de instrumentos para intentar detectar partículas subatómicas energéticas. En general, estos detectores tienen que medir diversas propiedades cinemáticas de cada partícula, como su energía, su momento lineal, la ubicación espacial de su traza y el tiempo de llegada al detector. Los neutrinos no se detectan directamente, sino a partir de la radiación emitida por los productos de sus interacciones.

El progreso científico surge a menudo de los avances en la tecnología de detectores, que consisten en: mejora de la precisión en la medida de las propiedades cinemáticas; mejora en la tasa de detección de las partículas, lo que lleva a un aumento en la precisión estadística; y, finalmente, reducción de costes, que permite la construcción de sistemas de detección de mayor tamaño que son más sensibles a los procesos poco frecuentes.

Todos los detectores de partículas acaban generando información en forma de señales eléctricas que deben ser procesadas por circuitos electrónicos, y digitalizadas para obtener datos numéricos que, a su vez, se pueden procesar en tiempo real y registrar para su posterior análisis. La utilidad de todos estos datos está muy condicionada a la existencia de Internet y de los sistemas de manipulación de datos de los ordenadores de todo el mundo.

Perspectivas adicionales

El experimento de detección de neutrinos long-baseline (LBNE, por sus siglas en inglés)

Se espera que este proyecto estadounidense con colaboración internacional esté en marcha en 2022. Se creará un «haz» de neutrinos artificial de alta intensidad en el Fermilab (Laboratorio Nacional Fermi) que se detectará a partir de sus interacciones poco frecuentes con un material diana situado a 1 300 km de distancia. El haz se generará a una profundidad de unos 1,5 km bajo la superficie terrestre en el Fermilab, cerca de Chicago, y atravesará material rocoso (hasta una profundidad de 35 km) hasta llegar a un detector ubicado en Dakota del Sur. Como los neutrinos son tan penetrantes, no es necesario excavar un túnel.



Figura 12.40
Trayectorias previstas de los neutrinos

1 Investiga:
   - **a** de qué manera está previsto que este detector proporcione información distinta a la que ofrecen otros detectores de neutrinos
   - **b** el porqué de escoger estas ubicaciones especiales y esta longitud de la trayectoria.

2 Si los neutrinos son tan difíciles de detectar/controlar, ¿cómo es posible que hablemos de un «haz» de neutrinos?

Enlace con la teoría del conocimiento

Todos estamos influidos y sesgados por nuestras experiencias y conocimientos previos

Mucho de nuestro conocimiento sobre las partículas subatómicas se basa en los modelos que utilizamos para interpretar los datos experimentales. ¿Cómo podemos asegurarnos de que estamos descubriendo una «verdad independiente» que no está influida por nuestros modelos previos? ¿Podemos hablar de la existencia de una única verdad?

Por descontado, los científicos que investigan en el ámbito de las partículas subatómicas (como el neutrino) hacen gala de su apertura de miras y su receptividad ante nuevas ideas. Indudablemente, se trata de un objetivo prioritario para todos los científicos, pero todos estamos influidos y restringidos, hasta cierto punto y de manera inevitable, por nuestras experiencias previas. Los proyectos caros deben tener objetivos muy concretos (o de otro modo los gobiernos no los financiarían), y estos objetivos a su vez focalizan el pensamiento de los científicos que trabajan en ellos. No obstante, el desarrollo de la ciencia a lo largo de los siglos demuestra que el uso de la imaginación para formular ideas nuevas y originales se encuentra en la propia naturaleza de la ciencia y de los científicos.

Es posible que a partir de estos últimos proyectos de investigación no surja una «única verdad» sobre los neutrinos (en el sentido de un conocimiento cierto en todo momento), aunque sí se espera que aumente nuestro conocimiento sobre estas escurridizas partículas fundamentales.

Ley de desintegración radiactiva y la constante de desintegración

La desintegración radiactiva se estudió en el Capítulo 7, aunque el tratamiento matemático se restringió a ejemplos relativos a un número entero de semividas. A lo largo de este capítulo profundizaremos en la comprensión de la desintegración radiactiva y, en concreto, ampliaremos la teoría para incluir cálculos relativos a cualquier duración temporal.

En el experimento de lanzamiento de dados descrito en la página 300, el aumento del número de dados lanzados aumenta, a su vez, el número de seises que aparecen (este experimento ofrece una analogía simple para la desintegración radiactiva). De manera similar, si se investiga la desintegración de un material radiactivo, se observa que cuanto mayor es el número de núcleos radiactivos de la muestra, mayor es la tasa de desintegración, tal como se mide con la tasa de recuento.

Este efecto se puede describir matemáticamente mediante la expresión:

$$-\frac{\Delta N}{\Delta t} \propto N$$

donde delta, Δ, representa «el cambio en» y N representa el número de núcleos de la muestra que no se han desintegrado en ese momento.

Esta relación matemática define una **desintegración exponencial**; es decir, un cambio en el que la tasa de cambio (decrecimiento) es proporcional al valor de la cantidad en ese momento.

(En el Capítulo 11 vimos el concepto de decrecimiento exponencial de la carga de un condensador.)

$\Delta N/\Delta t$ representa la tasa de cambio de los núcleos de la muestra, y $-\Delta N/\Delta t$ representa la *tasa de desintegración*.

Introduciendo una constante de proporcionalidad, λ, obtenemos:

$$-\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N$$

La constante λ se conoce como **constante de desintegración**, y sus unidades son las recíprocas de las del tiempo (por ejemplo s^{-1}). Como veremos más adelante, la constante de desintegración está estrechamente ligada a la semivida de la fuente. Cuanto mayor es el valor de λ, más rápido se desintegra el radionúclido y más corta es su semivida.

La constante de desintegración se define como la probabilidad por unidad de tiempo de que un núcleo determinado experimente una desintegración.

La **actividad**, A, de una fuente radiactiva es el número de núcleos que se desintegran por segundo. La actividad equivale a la tasa de desintegración:

$$\text{Actividad, } A, = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$$

y por tanto:

$$A = \lambda N$$

Debemos remarcar que *ninguna* de estas ecuaciones figura en el *Apéndice de datos de Física*.

La actividad se mide en **becquerelios**, Bq, donde un becquerelio se define como una desintegración por segundo. El nombre de la unidad se escogió en honor de Henri Becquerel, que compartió el premio Nobel de Física con Pierre y Marie Curie por su pionera investigación en el campo de la radioactividad.

Ejemplo resuelto

12 La actividad de una muestra radiactiva es $2{,}5 \times 10^5$ Bq y su constante de desintegración es $1{,}8 \times 10^{-16}\,s^{-1}$. Determina el número de núcleos no desintegrados que quedan en la muestra en ese momento.

$A = \lambda N$

$2{,}5 \times 10^{-5} = (1{,}8 \times 10^{-16}) \times N$

$N = \dfrac{2{,}5 \times 10^5}{1{,}8 \times 10^{-16}} = 1{,}4 \times 10^{11}$ núcleos no desintegrados

66 Una muestra radiactiva emite partículas alfa a una tasa de $2{,}1 \times 10^{12}$ por segundo en el momento en que quedan $5{,}0 \times 10^{20}$ núcleos sin desintegrar en la muestra. Determina la constante de desintegración de la muestra radiactiva.

67 Una muestra de núclido radiactivo contiene inicialmente $2{,}0 \times 10^5$ núcleos y su constante de desintegración es $0{,}40\ s^{-1}$. ¿Cuál es su actividad inicial?

68 Explica por qué la tasa de recuento detectada de una fuente radiactiva se reduce con el tiempo.

Soluciones de la ecuación de desintegración

Aunque la ecuación $A = -\Delta N/\Delta t = \lambda N$ define matemáticamente la desintegración radiactiva, no nos ofrece directamente lo que más nos interesa conocer: el valor de A, o de N, en cualquier instante de tiempo, t. Para ello podemos utilizar las ecuaciones siguientes, que se pueden describir como *soluciones* de la ecuación original. Estas ecuaciones son similares a las que utilizamos en el

Capítulo 11 para el decrecimiento exponencial de la intensidad de corriente (o d.p. o carga) de un condensador que se descarga.

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

En esta ecuación N_0 representa el número de núcleos sin desintegrar en una muestra al inicio de un periodo de tiempo de duración t, y N representa el número de núcleos sin desintegrar al final del periodo. Análogamente:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

donde A_0 representa la actividad de una muestra al inicio de un periodo de tiempo t, y A representa la actividad al final del periodo.

Como $A_0 = \lambda N_0$, la ecuación se puede expresar también como:

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

Esta ecuación figura en el *Apéndice de datos de Física*.

La *tasa de recuento*, C (un símbolo no estándar), medida por un detector de radiación en un laboratorio, *no* es una medida directa de la actividad de la fuente, sino que generalmente es proporcional a esta, de manera que también podemos escribir:

$$C = C_0 e^{-\lambda t}$$

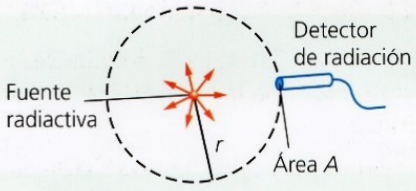


Figura 12.41
Un detector de radiación recibe solo una fracción de la radiación emitida por una fuente

En la Figura 12.41 podemos observar que un detector solo puede recibir parte de la radiación total procedente de una fuente. Podríamos utilizar el cociente $A/4\pi r^2$ para determinar la fracción de radiación que llega al detector, pero para ello deberíamos suponer que no se absorbe radiación entre la fuente y el detector y también que la radiación se emite por igual en todas direcciones. La determinación de la actividad de la fuente también es difícil porque no se recuenta el total de la radiación que entra en el detector.

Ejemplos resueltos

13 La fracción de átomos radiactivos de una muestra que se desintegra en 12 días es $\frac{7}{8}$. Calcula la fracción de átomos radiactivos que queda al cabo de 24 días.

Podemos responder de una forma directa sin usar exponenciales: la muestra pasa tres semividas para reducirse hasta $\frac{1}{8}$, de modo que la semivida es cuatro días. En 24 días han pasado 6 semividas, por tanto la fracción de átomos se reduce hasta $\frac{1}{64}$. Podemos obtener la misma respuesta utilizando la ecuación $N = N_0 e^{-\lambda t}$.

Al cabo de 12 días:

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{8} = e^{-\lambda(12)}$$

$$8 = e^{12\lambda}$$

$$\lambda = \frac{\ln 8}{12} = 0{,}173$$

Al cabo de 24 días:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-0{,}173(24)} = 0{,}0157 = \frac{1}{64}$$

14 La constante de desintegración para un radioisótopo es 0,054 años^{-1}. Si la actividad al inicio del año 2014 era $4{,}7 \times 10^2$ Bq, calcula la actividad al inicio de 2018.

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

$$A_{2018} = 470 \times e^{-0{,}054 \times 4}$$

$$\ln(A_{2018}) = \ln 470 - (0{,}054 \times 4)$$

$$A_{2018} = 379\,\text{Bq}$$

69 Una muestra de radio contiene $6{,}64 \times 10^{23}$ átomos radiactivos. Emite partículas alfa y su constante de desintegración es $1{,}36 \times 10^{-11}\,s^{-1}$. ¿Cuántos átomos de radio quedan al cabo de 100 años?

70 La constante de desintegración de un núclido radiactivo es $0{,}0126\,s^{-1}$. Inicialmente una muestra del núclido contiene 10 000 núcleos.
a ¿Cuál es la actividad inicial de la muestra?
b ¿Cuántos núcleos quedan sin desintegrar al cabo de 200 s?

71 **a** Se mide la tasa de recuento de una fuente y el resultado es $673\,s^{-1}$. Determina el valor de la constante de desintegración sabiendo que al cabo de tres horas exactamente la tasa se ha reducido hasta $668\,s^{-1}$.
b Explica por qué este valor puede ser poco fiable.

72 La actividad de una fuente de radiación es $4{,}7 \times 10^4$ Bq. Si la tasa de recuento media de la radiación de fondo es $0{,}58\,s^{-1}$, ¿cuál es la máxima tasa de recuento posible que podría registrar un detector cuya área de recepción efectiva es $0{,}85\,cm^2$ si está ubicado:
a a 50 cm de la fuente
b a 5 cm de la fuente?
c ¿Por qué tus respuestas son *valores máximos*?

73 La actividad de una fuente radiactiva es $8{,}7 \times 10^5$ Bq. Si su constante de desintegración es $6{,}3 \times 10^{-3}\,s^{-1}$, ¿cuántos minutos transcurrirán hasta que la actividad descienda hasta $1{,}0 \times 10^4$ Bq?

74 En los experimentos demostrativos escolares se suele utilizar cobalto-60, una fuente radiactiva de rayos gamma. Calcula la masa máxima de cobalto-60 de una fuente escolar sabiendo que la actividad máxima permitida en este caso es 200 kBq. (La constante de desintegración del cobalto-60 es 0,131 $años^{-1}$.)

Constante de desintegración y semivida (o periodo de semidesintegración)

El concepto de semivida de un núclido radiactivo se introdujo en el Capítulo 7. Mediante la ecuación $N = N_0e^{-\lambda t}$, podemos derivar fácilmente una ecuación que relaciona la semivida (o periodo de semidesintegración), $T_{½}$, con la constante de desintegración, λ.

Para todo núclido radiactivo, el número de núcleos sin desintegrar al cabo de una semivida es, por la propia definición de semivida, igual a $N_0/2$, donde N_0 representa el número original de núcleos no desintegrados. Sustituyendo este valor de N en la ecuación de la desintegración radiactiva en el instante $t = T_{½}$ tenemos:

$$\frac{N_0}{2} = N_0e^{-\lambda T_{½}}$$

Dividiendo cada miembro de la ecuación entre N_0:

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{½}} \text{ o } 2 = e^{\lambda T_{½}}$$

Tomando logaritmos naturales (en base *e*):

$$\ln 2 = \lambda T_{½}$$

Por tanto:

$$T_{½} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Esta útil ecuación *no* figura en el *Apéndice de datos de Física*. De forma alternativa, si introducimos el valor de ln2:

$$T_{½} = \frac{0{,}693}{\lambda}$$

Ejemplos resueltos

15 La tasa de recuento de una fuente radiactiva es $100\,s^{-1}$ en un determinado instante de tiempo. Al cabo de 100 s baja hasta $20\,s^{-1}$. La medida de la tasa de recuento de la radiación de fondo es $10\,s^{-1}$. Calcula la semivida de la muestra. Supón que la tasa de recuento es una medida de la actividad.

tasa de recuento inicial debida a la muestra = $100 - 10 = 90\,s^{-1}$

tasa de recuento debida a la muestra al cabo de 100 s = $20 - 10 = 10\,s^{-1}$

$$C = C_0 e^{-\lambda t}$$

$$10 = 90e^{-100\lambda}$$

$$\lambda = \frac{-\ln \frac{10}{90}}{100} = 0{,}022$$

$$T_{1/2} = \frac{0{,}693}{0{,}022} = 32\,\text{s}$$

16 El elemento radiactivo A tiene $6{,}4 \times 10^{11}$ átomos y una semivida de 2,00 horas. El elemento radiactivo B tiene $8{,}0 \times 10^{10}$ átomos y una semivida de 3,00 horas. Calcula cuánto tiempo transcurrirá hasta que ambos elementos tengan el mismo número de átomos radiactivos.

Para A:

$$\lambda_A = \frac{0{,}693}{2{,}00} = 0{,}347\,\text{h}^{-1}$$

Para B:

$$\lambda_B = \frac{0{,}693}{3{,}00} = 0{,}231\,\text{h}^{-1}$$

En el instante t:

$$N_A = (6{,}4 \times 10^{11})e^{-0{,}347t},\ N_B = (8{,}0 \times 10^{10})e^{-0{,}231t}$$

Para $N_A = N_B$:

$$(6{,}4 \times 10^{11})e^{-0{,}347t} = (8{,}0 \times 10^{10})e^{-0{,}231t}$$

$$8 = \frac{e^{-0{,}231t}}{e^{-0{,}347t}}$$

$$8 = e^{0{,}116t}$$

$$\ln 8 = \ln(e^{0{,}116t});\ 2{,}079 = 0{,}116t$$

$$t = 18\,\text{h}$$

Ambos elementos tendrán el mismo número de átomos activos al cabo de 18 horas.

75 El carbono-14 radiactivo de una muestra de cuero se desintegra con una semivida de 5730 años.
- **a** ¿Cuál es la constante de desintegración?
- **b** Calcula el porcentaje de carbono radiactivo que queda al cabo de 10000 años.

76 Una fuente pura contiene $3{,}8 \times 10^{15}$ átomos en un instante determinado. Al cabo de una semana exactamente, el número de átomos radiactivos se ha reducido hasta $2{,}5 \times 10^{14}$. ¿Cuál es la semivida de esta fuente?

77 La semivida del estroncio-90 es 28,8 años. ¿Cuánto tiempo tarda la tasa de recuento de una fuente en descender un:
- **a** 1%
- **b** 99%?

78 Una fuente de cobalto-60 empleada en radioterapia hospitalaria debe ser reemplazada cuando su actividad se ha reducido al 70% del valor que tenía cuando se compró. Calcula su semivida sabiendo que se compró a mediados de febrero de 2011 y se reemplazó a mediados de noviembre de 2013.

79 La tasa de recuento de una fuente radiactiva es 472 s^{-1}. Calcula la tasa de recuento al cabo de una hora sabiendo que su semivida es 13,71 minutos.

80 El uranio-238 es el isótopo más común del uranio, y su semivida es de 4,47 miles de millones de años. La edad de la Tierra es 4,54 miles de millones de años.
- **a** ¿Qué porcentaje (hasta una cifra decimal) del uranio-238 original está todavía presente en la corteza terrestre?
- **b** Sugiere cómo se podría determinar (en principio) la «edad» de las rocas mediante el análisis de los radioisótopos que contienen.
- **c** ¿Por qué este tipo de métodos son probablemente poco exactos?

Medida de la semivida (o periodo de semidesintegración)

El método empleado para medir la semivida de un elemento radiactivo depende de si esta es relativamente corta o larga. Cuando la actividad de la muestra se mantiene aproximadamente constante durante unas pocas horas, podemos decir que tiene una semivida relativamente larga. Por el contrario, si su actividad decrece de forma significativa durante unas pocas horas, la semivida del elemento es relativamente corta.

Isótopos con semividas largas

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$$

Si podemos determinar la actividad, A, de una fuente, y conocemos el número de átomos no desintegrados en el momento de la medida, N, podemos calcular su constante de desintegración (y por tanto su semivida). En teoría se trata de un cálculo sencillo, pero la determinación experimental del número de átomos de una fuente no es fácil, especialmente cuando el isótopo en cuestión se encuentra por lo general en una fuente que contiene una mezcla de otros isótopos. En este caso se requiere un equipo de medida muy sofisticado, como un espectrómetro de masas.

Para una mezcla pura de masa m, el número de átomos del isótopo se puede determinar a partir de la masa atómica relativa, A_r, y el número de Avogadro, N_A, de la manera siguiente:

$$N = \frac{mN_A}{A_r}$$

Por tanto, midiendo la actividad ($A = \Delta N/\Delta t$) podemos calcular la semivida o periodo de semidesintegración, $T_{½}$, a partir de la ecuación:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{-\lambda m N_A}{A_r} = \frac{-0{,}693 m N_A}{T_{½} A_r}$$

Isótopos con semividas cortas



El registro de la tasa de recuento (menos la tasa de la radiación de fondo) a intervalos de tiempo regulares permite determinar la semivida de un isótopo cuando esta es de unas pocas horas o menos. Un radioisótopo de semivida corta se puede utilizar en un laboratorio escolar si se extrae del resto de radioisótopos de su cadena de desintegración *justo* antes de comenzar el experimento. El proceso de extracción se puede basar en cualquier propiedad física o química que solo tenga este isótopo en concreto.

Suponemos que la tasa de recuento ajustada es proporcional a la actividad. La semivida se puede obtener directamente a partir de una gráfica en la que se representa la tasa de recuento, C, en función del tiempo, t, tal como se explicó en la página 301.

También se puede representar una gráfica del logaritmo natural de la tasa de recuento, C, en función del tiempo, t. En este caso se obtiene una línea recta cuya pendiente es $-\lambda$ (Figura 12.42). Como $T_{½} = 0{,}693/\lambda$, se puede calcular la semivida. Este método es mejor que el anterior, porque se puede evaluar muy rápidamente la fiabilidad de los datos observando lo cerca que se encuentran de la recta de ajuste.

Este método se basa en la transformación de la ecuación $C = C_0 e^{-\lambda t}$, que describe la tasa de recuento de la desintegración radiactiva.

Tomando logaritmos naturales:

$$\ln C = \ln C_0 - \lambda t$$

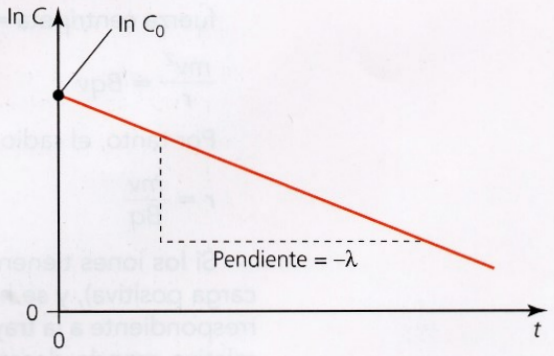


Figura 12.42
Gráfica logarítmico-lineal en la que se representa la desintegración exponencial de un núclido radiactivo

Esta ecuación se puede comparar con la ecuación de una recta ($y = mx + c$), de manera que la pendiente es igual a $-\lambda$.

Cuando la semivida de un isótopo es muy corta, de menos de un segundo, ambos métodos son poco adecuados. (Este tipo de semividas se pueden determinar a partir de las trayectorias observadas en una cámara de burbujas o en una cámara de niebla).

Aplicaciones

Espectrómetro de masas

La primera investigación directa de la masa de los átomos (y de las moléculas) fue posible gracias al desarrollo del *espectrómetro de masas*. El primero fue construido en 1918 por William Aston, un estudiante de J. J. Thomson, y ofreció pruebas directas de la existencia de los isótopos. En 1932 William Bainbridge desarrolló un espectrómetro de masas más preciso.

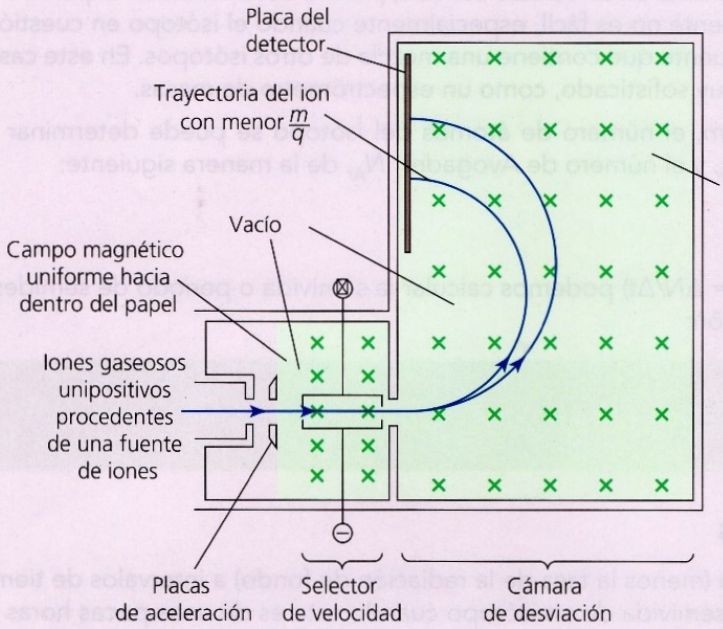


Figura 12.43
Características esenciales de un espectrómetro de masas de Bainbridge

En este aparato se utiliza la interacción de los iones cargados con los campos eléctricos y magnéticos para medir las masas relativas de los átomos y determinar sus abundancias relativas. En la Figura 12.43 se representa el funcionamiento de un espectrómetro de masas (simple) de Bainbridge. En el interior de la máquina se hace el vacío, impidiendo que entre el aire, con el objetivo de evitar las colisiones con las partículas de aire, que perturbarían el desplazamiento de los iones generados en el interior.

En el espectrómetro de masas se generan iones positivos mediante el bombardeo de átomos o moléculas de gas (M en la ecuación siguiente) con un chorro de electrones a alta velocidad:

$$M(g) + e^- \rightarrow M^+(g) + e^- + e^-$$

Los iones son acelerados (mediante un par de placas positivas) y a continuación atraviesan un *selector de velocidad*, donde se les aplican campos eléctricos y magnéticos de manera que solo un haz de iones que viaja a la misma velocidad continua en línea recta para entrar en la cámara siguiente. Seguidamente estos iones viajan a través de un campo magnético uniforme que hace que se muevan siguiendo una trayectoria circular de radio, r, que depende del cociente entre la masa del ion y su carga. Para iones de masa, m, y carga, q, que viajan a velocidad, v, a través del campo magnético, B:

fuerza centrípeta = fuerza debida al campo magnético

$$\frac{mv^2}{r} = Bqv$$

Por tanto, el radio del círculo que describe el ion es:

$$r = \frac{mv}{Bq}$$

Si los iones tienen la misma carga, q (habitualmente unipositiva, por ejemplo, con una única carga positiva), y se han seleccionado para viajar a la misma velocidad, v, el radio del círculo correspondiente a la trayectoria de cada ion depende únicamente de su masa. Un ion con una masa relativa grande describe un círculo de mayor diámetro (para una misma intensidad del campo magnético).

Sobre la placa del detector se observan diversas líneas verticales, cada una correspondiente a un isótopo distinto del mismo elemento. La posición de una línea sobre la placa permite determinar el radio, r. La masa del ión, m, se puede determinar porque se conoce la intensidad del campo magnético, B, la carga del ion, e, y su velocidad, v. El modelo de espectrómetro de masas de Bainbridge que se representa en la figura, que es el más antiguo, es en realidad un espectrógrafo de masas, porque el haz de iones se dirige sobre una placa fotográfica (Figura 12.44). Las intensidades relativas de las líneas permiten estimar las cantidades relativas de isótopos.

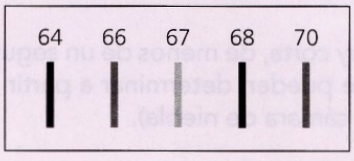


Figura 12.44
Espectro de masas obtenido con un espectrógrafo de masas

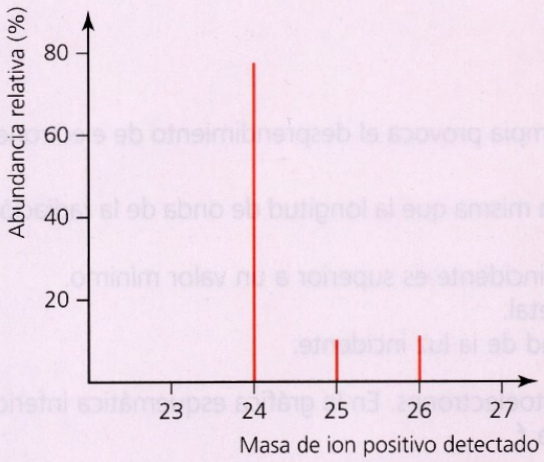


Figura 12.45
Espectro de masas de los átomos de magnesio que se producen de forma natural, en el que se representan los porcentajes de abundancia de los tres isótopos con sus masas respectivas

Los espectrómetros modernos neutralizan los iones positivos con electrones y recuentan el número de iones directamente, antes de amplificar la señal. Los resultados se visualizan en una pantalla de ordenador en forma de «diagrama de barras» (Figura 12.45).

Los espectrómetros de masas detectan los distintos isótopos en función de su masa. Algunos satélites y naves espaciales están equipados con espectrómetros de masas que les permiten identificar el pequeño número de partículas que interceptan en el espacio exterior. Por ejemplo, el satélite SOHO analiza el viento solar con un espectrómetro de masas. También se utilizan en la datación con carbono radiactivo (página 305).

1 Investiga sobre la utilización de los espectrómetros de masas en misiones para estudiar el planeta Marte. ¿Qué información han proporcionado a los científicos?

2 Los iones unipositivos del neón-21, $^{21}Ne^{+}$, viajan a una velocidad de $2{,}50 \times 10^{5}$ m s^{-1} y entran en un campo magnético de 0,80 T que los desvía y les hace describir una trayectoria circular. Calcula el radio de esa trayectoria circular.

Medicina nuclear

La utilización hospitalaria de los radionúclidos para el diagnóstico y el tratamiento de enfermedades es cada vez más frecuente en todo el mundo. La fuente de radiación se debe escoger cuidadosamente según el objetivo que se busca conseguir, y para ello se deben tener en cuenta factores tales como:

- tipos de radiación emitida
- energías de las partículas y de la radiación emitida
- duración de la exposición de los pacientes a la radiación
- actividad de la fuente
- semivida (o periodo de semidesintegración) de la fuente.

81 Se determina experimentalmente la actividad de 1,0 g de radio-226 y resulta ser $1{,}14 \times 10^{18}$ partículas alfa por año. Calcula su semivida.

82 La semivida del radio-226 es muy larga (>1 000 años), mientras que el radio-227 tiene una semivida de 42 minutos. Explica brevemente cómo se podrían determinar experimentalmente las semividas de estos isótopos del radio.

83 Los datos de la tabla se han obtenido a partir de la desintegración del cesio-130. Representa gráficamente ln *A* en función de *t* para determinar la constante de desintegración y, por tanto, la semivida. (Las cifras se han ajustado para tener en cuenta el recuento de la radiación de fondo.)

Tiempo/s	Actividad/s^{-1}
0	200
500	165
1 500	113
2 500	79
3 500	54
4 500	38
5 500	26

84 Una muestra contiene átomos de un elemento radiactivo A, mientras que otra muestra contiene átomos de un elemento radiactivo B. Al cabo de un intervalo de tiempo determinado, se observa que se han desintegrado los ⅞ de átomos de A y los ¾ de átomos de B. Calcula el valor del cociente: $\frac{\text{semivida del elemento A}}{\text{semivida del elemento B}}$.

85 Investiga las propiedades y aplicaciones de un radionúclido en particular utilizado en hospitales.

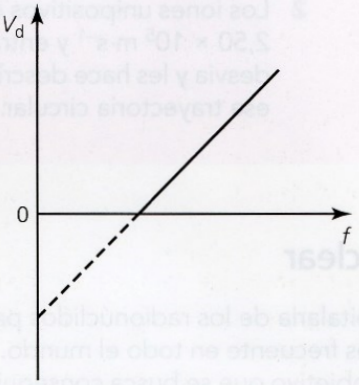
Selección de preguntas de examen

Hoja 1 Preguntas del IB y preguntas tipo IB

1 En el efecto fotoeléctrico, la luz incidente sobre una superficie metálica limpia provoca el desprendimiento de electrones de la superficie. ¿Cuál de las afirmaciones siguientes es correcta?

A. La longitud de onda de De Broglie de los electrones desprendidos es la misma que la longitud de onda de la radiación incidente.
B. Se desprenden electrones solo si la longitud de onda de la radiación incidente es superior a un valor mínimo.
C. La energía máxima de los electrones es independiente del tipo de metal.
D. La energía máxima de los electrones es independiente de la intensidad de la luz incidente.

2 Se hace incidir luz ultravioleta sobre una superficie de cinc y se emiten fotoelectrones. En la gráfica esquemática inferior se representa la variación del potencial de detención V_d con la frecuencia f.



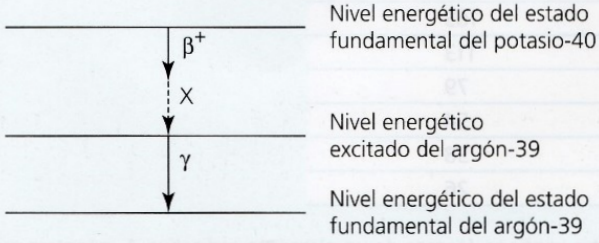
La constante de Planck se puede determinar a partir de la carga de un electrón e multiplicada por:

A. el valor del corte con el eje y
B. el valor del corte con el eje x
C. la pendiente
D. el área bajo la gráfica.

3 En el modelo de Schrödinger para el átomo de hidrógeno, la probabilidad de encontrar un electrón en una pequeña región del espacio se calcula a partir de:

A. el principio de incertidumbre de Heisenberg (tiempo-energía)
B. la hipótesis de De Broglie
C. (amplitud de la función de onda)^2
D. el valor de la raíz cuadrada de la función de onda.

4 Un núcleo de potasio-40 experimenta una desintegración beta positiva y se transforma en un núcleo de argón-39 en un estado excitado, que, a su vez, alcanza su estado fundamental mediante la emisión de un fotón gamma (γ). En el diagrama inferior se representan los niveles energéticos de la emisión β^+ y γ para este proceso de desintegración.



La partícula representada por la letra X es

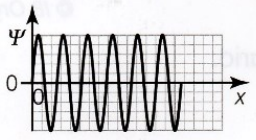
A. un antineutrino
B. un neutrino
C. un electrón
D. un fotón.

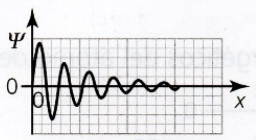
© IB Organization

5 Si una partícula alfa y un protón tienen la misma longitud de onda de De Broglie, el cociente *velocidad de la partícula alfa/velocidad del protón* es aproximadamente igual a:

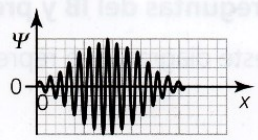
A. ¼
B. ½
C. 1
D. 2

6 En los diagramas siguientes se representa la variación de la función de onda Ψ con la distancia x para cuatro electrones distintos. La escala del eje horizontal es la misma para todos los diagramas. ¿Cuál de los cuatro electrones presenta una mayor incertidumbre en el momento lineal?

A. 

B. 

C. 

D. 

© *IB Organization*

7 ¿Cuál de las afirmaciones siguientes ofrece pruebas de la existencia de niveles de energía discretos en el interior del núcleo?

A. Las partículas alfa se emiten con energías discretas.
B. Las partículas beta se emiten con energías discretas.
C. Los neutrinos se emiten con energías discretas.
D. La luz se emite con energías discretas.

8 La ecuación $\Delta N/\Delta t = -\lambda N$ se puede utilizar para representar la desintegración radiactiva. En esta ecuación:

A. λ representa la semivida (o periodo de semidesintegración) del núclido
B. el signo negativo representa una desintegración
C. N representa la actividad de la fuente
D. el módulo de λ decrece con el tiempo.

9 Los diámetros nucleares se pueden determinar a partir de:

A. medidas realizadas con espectrómetros de masas
B. espectros de rayos gamma
C. constantes de desintegración
D. la difracción de haces de electrones de alta energía.

10 La cuantización del momento angular se utilizó en el modelo atómico de Bohr para explicar la emisión de:

A. espectros de líneas
B. partículas alfa
C. partículas beta
D. rayos gamma.

11 La probabilidad de que una partícula experimente un efecto túnel cuántico a través de una barrera de potencial *no* depende de:

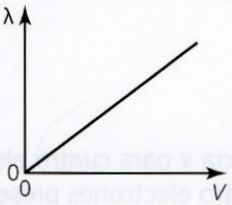
A. la carga de la partícula
B. la masa de la partícula
C. la energía de la partícula
D. la anchura de la barrera.

12 Un fotón se puede convertir en una partícula y su antipartícula. Para que esto sea posible:

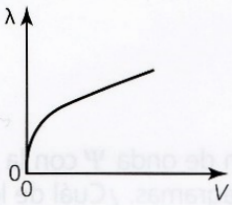
A. la frecuencia del fotón debe ser inferior a una determinada frecuencia umbral
B. otra partícula debe estar involucrada en el proceso
C. las dos partículas creadas se deben desplazar en la misma dirección
D. el momento no se puede conservar en la interacción.

13 Un electrón se acelera desde el estado de reposo a través de una diferencia de potencial *V*. ¿Cuál de las gráficas siguientes representa la variación de la longitud de onda de De Broglie λ del electrón respecto a la diferencia de potencial *V*?

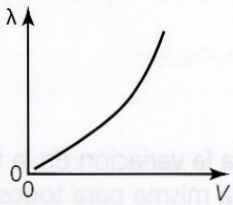
A.



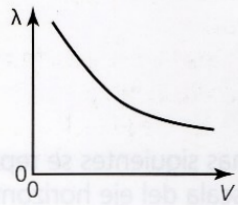
B.



C.



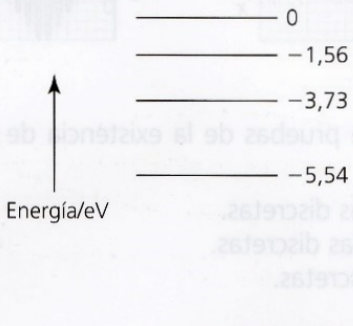
D.



Hoja 2 Preguntas del IB y preguntas tipo IB

© IB Organization

1 a En este diagrama se representan algunos de los niveles energéticos del átomo de mercurio.



En las transiciones electrónicas entre los niveles se emiten fotones. Copia el diagrama y dibuja flechas que representen la transición (sobre estos niveles energéticos) que da lugar a:

i. la longitud de onda del fotón más larga (márcala con una L) (1)

ii. la longitud de onda del fotón más corta (márcala con una S). (1)

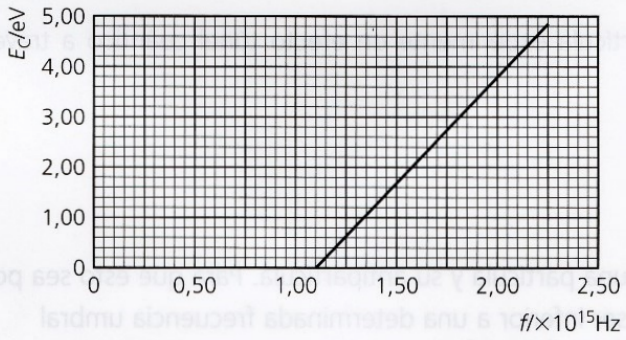
b Determina la longitud de onda asociada a la flecha que has marcado con una S. (3)

c Un núcleo del isótopo bismuto-212 experimenta una desintegración alfa y se transforma en un núcleo de un isótopo de talio. En la desintegración también se emite un fotón gamma. Representa en un diagrama convenientemente rotulado los niveles energéticos nucleares correspondientes a esta desintegración. (2)

d La actividad de una muestra de bismuto-212 recién preparada es $2{,}80 \times 10^{13}$ Bq. Al cabo de 80,0 minutos la actividad es de $1{,}13 \times 10^{13}$ Bq. Determina la semivida del bismuto-212. (2)

© IB Organization

2 Sobre la superficie de un metal en condiciones de vacío se hace incidir una luz de frecuencia *f*. Como resultado, la superficie del metal emite electrones. En la gráfica inferior se representa la variación de la energía cinética máxima, E_C, de los electrones emitidos respecto a la frecuencia *f*.



a La gráfica indica que existe una frecuencia umbral de la luz incidente por debajo de la cual la superficie no emite electrones. Explica el significado de esta frecuencia umbral en el marco de la teoría de Einstein del efecto fotoeléctrico, haciendo referencia a la constante de Planck y a la función trabajo de desprendimiento de electrones. (4)

b Utiliza la gráfica del apartado **a** para calcular:

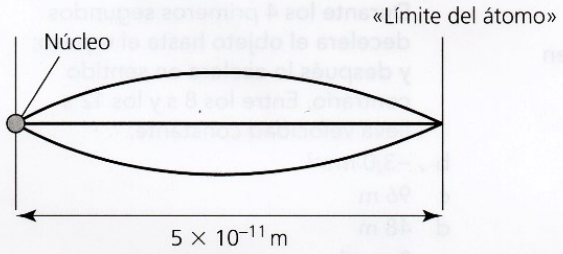
i. la frecuencia umbral (1)

ii. la constante de Planck (1)

iii. el trabajo de desprendimiento de electrones del metal. (2)

© IB Organization

3 En un modelo simple del átomo de hidrógeno, el «tamaño» del átomo determina la energía cinética del electrón. Su longitud de onda de De Broglie equivale a la longitud de onda de la onda estacionaria confinada entre el núcleo y el «límite» del átomo, tal como se representa en la imagen inferior.



El «límite» del átomo se encuentra a 5×10^{-11} m del núcleo.

a i. ¿Cuál es la longitud de onda de De Broglie del electrón? (1)

ii. El límite del átomo de hidrógeno se acerca al núcleo. Describe los cambios que se producen en la energía cinética del electrón. (2)

Existe otro modelo del átomo de hidrógeno diferente que tiene en cuenta el hecho de que la energía potencial eléctrica del electrón depende de su distancia al núcleo.

b i. Explica la variación de la energía potencial eléctrica del electrón respecto a la distancia al núcleo. (3)

ii. Utiliza tu respuesta al apartado **b i** para describir la variación de la energía cinética del electrón respecto a la distancia al núcleo. (2)

iii. Utiliza tu respuesta al apartado **b ii** para sugerir cómo podría variar la longitud de onda de la onda estacionaria del electrón respecto a la distancia que la separa del núcleo. (3)

© IB Organization

Respuestas a las preguntas de autoevaluación de los capítulos 1 a 12

1 Medidas e incertidumbres

1 a 10^{-3} kg c 10 kg
b 10^{-3} kg d 10^{21} kg
2 a 10 m c 10^{6}
b 10^{8} d 10^{-4} m
3 a 2×10^{9}s
b 10^{8} s
c 1×10^{-8} s
4 a Aproximadamente 10 a 1; 1 orden de magnitud
b Aproximadamente 10^{25} a 1; 25 órdenes de magnitud
c Aproximadamente 10^{-9} a 1; 9 órdenes de magnitud
5 a ± 3 g b 0,63%
6 a 4,2 (m) c 19%
b *a*: 4,7%; *t*: 7,1% d ± 0,8 (m)
7 ± 0,03

2 Mecánica

1 a Aceleración durante los primeros 100 s; después velocidad constante hasta los 200 s, seguida por una deceleración hasta el reposo a los 300 s.
b 3600 m
c 20 m s^{-1}
d 12 m s^{-1}
2 c Los nadadores pueden acelerar empujando contra las paredes de la piscina cada vez que se dan la vuelta.
4 El corredor comienza desde el reposo y acelera hacia un punto de referencia (desplazamiento cero); después, se aleja del punto de referencia a velocidad constante.
5 a, c El objeto se mueve (oscila) hacia atrás y hacia delante respecto a un punto de referencia; la máxima velocidad la alcanza cuando se encuentra a mitad del movimiento y decelera a medida que se aleja hasta que su velocidad es cero en el punto de desplazamiento máximo; a continuación, acelera en sentido contrario.
b Igual módulo; sentidos opuestos
d 8 cm s^{-1} y 0 cm s^{-1}
e Un péndulo o una masa colgada en el extremo de un muelle
6 a Comienza desde el reposo, aceleración constante durante 2 s; seguida de una velocidad constante durante 4 s; y finalmente una deceleración durante 1 s hasta el reposo.
b 1,5 m s^{-2}; 0 m s^{-2}; −3,0 m s^{-2}
c 16,5 m
d 2,4 m s^{-1}
7 2,8 m s^{-2} y 190 m
8 a El objeto experimenta una aceleración constante durante 8 s. Durante los 4 primeros segundos decelera el objeto hasta el reposo; y después lo acelera en sentido contrario. Entre los 8 s y los 12 s lleva velocidad constante.
b −3,0 m s^{-2}
c 96 m
d 48 m
e 8 m s^{-1}
11 10 m s^{-1}
12 La gráfica debería mostrar una velocidad constante que cambia muy rápidamente hasta otra velocidad constante de signo opuesto. La aceleración debería ser cero excepto durante el impacto.
14 a 1,9 m s^{-1}
b 2,7 m
c 1,0 m s^{-2}
15 a 1540 m b 35,8 s
16 a 4100 m b 1600 s
17 a 3,0 m s^{-2} b 24 m s^{-1}
18 a 5,3 s después de que el coche de policía haya empezado a moverse
b No; el coche infractor ha recorrido 210 m; el coche de policía ha recorrido 192 m
c Al cabo de 12 s
19 a −13 m s^{-2} b 32 m s^{-1}
20 a 8,72 km s^{-1} b $3{,}01 \times 10^{6}$ km
23 a 0,65 s
b 7,8 m s^{-1}
c 7,8 m s^{-1}
24 Al cabo de 1,2 s o 3,3 s
25 0,34 s más tarde
26 a 3,77 s más tarde
b 24,2 m s^{-1}
c 29,9 m
27 a 28,4 m
b 39,6 m
28 5,5 m s^{-1}
29 La aceleración del conductor es el doble de la debida a la gravedad, por tanto, la fuerza que actúa sobre él es el doble de su peso.
30 a La distancia aumenta a medida que caen
b Consideremos la ecuación $e = ut + \frac{1}{2}at^2$ para ambas piedras desde el momento en que se deja caer la segunda; la primera piedra siempre habrá recorrido una distancia adicional *ut*, que aumenta con el tiempo.
31 a 17 cm, ignorando la resistencia del aire
b Por ejemplo, a una velocidad de despegue de 3,4 m s^{-1} le corresponde una altura de 60 cm.
c Por ejemplo, una reducción de altura de 30 cm sugiere una aceleración de unos 20 m s^{-2}.
d Aproximadamente 0,2 s
33 a 13,0 s b 127 m s^{-1}
34 b la aceleración será equivalente al doble del gradiente de una gráfica s–t^2.
36 7,69 m s^{-1} y 27,3 m s^{-1}
37 a 17 km h^{-1} b 2 min
38 a 15 m s^{-1}
b i Igual ii Menor
41 a 0,167 s
b 0,137 m por debajo del centro del blanco
42 a 46 m por encima del mar
b 30 m s^{-1} hacia abajo
c 4,7 s
d 96 m
e 36 m s^{-1} a 56° con respecto a la horizontal
43 528 m
44 a 23°; v_V = 1,5 m s^{-1}
v_H = 3,5 m s^{-1}
b 98 cm
45 b No hay resistencia del aire ni fricción (y la bola no tiene una energía cinética de rotación significativa).
c Las masas más grandes experimentarán fuerzas gravitatorias también mayores, pero la misma aceleración, $a = F/m$ (suponiendo que no hay fricción o resistencia del aire)
46 28 m s^{-1}
47 a $1{,}23 \times 10^{4}$ N
b 31,8 N
c $2{,}43 \times 10^{-3}$ N
48 1,33 N
49 a $5{,}60 \times 10^{6}$ N
b Aproximadamente 50000 kg; del orden del 9%
c El módulo de las fuerzas que detienen el movimiento del avión

cuando aterriza no es tan grande como el de las fuerzas que lo aceleran cuando despega.

d La masa se ha reducido en 180 toneladas; la mayoría del combustible que transportaba se ha quemado.

50 Debajo del objeto hay una masa menor que la de la Tierra y por encima hay parte de la masa de la Tierra.

51 8,9 N kg^{-1}; cerca del 10% menor que sobre la superficie terrestre.

52 La circunferencia de A tiene longitud doble que la de B, su superficie es el cuádruple y su volumen, masa y peso son ocho veces mayores que los correspondientes a B.

55 0 N, 2 N, 4 N, 6 N

56 10,7 N formando un ángulo de 44° con la fuerza de 12 N

57 9,1 N formando un ángulo de 32° con la fuerza de 7,7 N

58 76 N formando un ángulo de 14° con la fuerza de 74 N

59 b 37 N en la dirección y sentido de la fuerza aplicada

60 a 3,33 N

b 1,72 N

61 b 14 N paralela al plano inclinado; 30 N perpendicular al plano inclinado

62 a $6{,}68 \times 10^4$ N

b $1{,}74 \times 10^4$ N

c 0,045 m s^{-2}

d La componente del peso (que actúa hacia abajo de la pendiente) de un tren pesado es tan grande que puede ser mayor que la fuerza resultante hacia delante proporcionada por la locomotora.

64 Todas las flechas idénticas y orientadas hacia abajo

65 a Un vector de fuerza de 300 N actuando hacia abajo desde el centro de la maleta, etiquetado como peso; una flecha de la misma longitud y sentido opuesto empujando hacia arriba, etiquetada como fuerza de reacción normal.

b Añadimos una flecha hacia arriba desde el mango de la maleta con una longitud que sea la mitad de la de los vectores anteriores, etiquetada como tirón de la mano, 150 N; la fuerza de reacción normal se reduce a 150 N

66 La lectura aumenta cuando se necesita una fuerza para acelerar el libro hacia arriba; y disminuye cuando se acelera el libro hacia abajo.

67 a No si el ascensor se mueve con velocidad constante; esto es porque las fuerzas que actúan sobre ti serían las mismas en los tres casos.

b El vector peso es el mismo en todos los diagramas; si la persona acelera, la fuerza procedente del suelo será mayor o menor que el peso.

68 a i El peso y la resistencia del aire sobre el cuerpo del paracaidista serán iguales en módulo y de sentidos contrarios; en consecuencia habrá una fuerza hacia arriba sobre el paracaidista debida al paracaídas.

ii La suma de las fuerzas hacia arriba sobre el paracaidista (del paracaídas y la resistencia del aire) tendrá el mismo módulo y sentido contrario que el peso.

69 14 N

70 El peso actúa hacia abajo desde el centro de masas del escalador; la tensión actúa a lo largo de la cuerda, lejos del escalador; el empuje de la roca actúa desde los pies del escalador hasta el punto donde se cruzan las otras dos fuerzas. (Se puede expresar en forma de una fuerza normal y la fricción).

71 a El peso de B será ocho veces mayor que el de A; la resistencia del aire que actúa sobre B será cuatro veces mayor que la que actúa sobre A.

b La gota A se mueve a velocidad constante porque las fuerzas están compensadas; la gota B se acelera porque hay una fuerza resultante, ya que su peso es mayor que la resistencia del aire que actúa sobre ella.

72 a Significa que no hay fricción

b Sí. No hay ningún motivo que lo impida, pero significaría que sería más fácil levantar el objeto verticalmente que desplazarlo horizontalmente, lo cual es poco habitual y puede requerir más explicaciones.

73 a ≈ 90 N

b ≈ 20 N

74 a El ángulo de la pendiente se puede incrementar lentamente *justo* hasta que la masa empiece a deslizarse hacia abajo. En ese ángulo la componente del peso hacia abajo de la pendiente es igual a la fuerza de fricción hacia arriba de la pendiente.

b 0,71

75 a $9{,}2 \times 10^3$ N

b $1{,}1 \times 10^4$ N

c El peso adicional aumenta las fuerzas de fricción entre los neumáticos y la vía y mejora la seguridad, pero la masa adicional en el coche significa que hace falta una fuerza mayor para detenerlo (que con un solo conductor).

76 Se puede esparcir sal o gravilla sobre la vía. La sal también se puede emplear para favorecer la fusión del hielo.

79 $2{,}56 \times 10^5$ N

80 2,4 N

81 a 2,39 m s^{-2} b 1 120 m

82 a −3,5 m s^{-2} b 4200 N

83 b 0,27 m s^{-2}

c Para una mayor aceleración se necesitaría una fuerza mucho mayor; es posible que el cordel no sea lo bastante resistente y se puede romper.

84 a 0,44 b 0,47 m s^{-2}

85 a 25 grados b 0,68 m s^{-2}

86 La pelota más dura no se puede deformar demasiado y por tanto se decelerará más rápido. (Tendrá una mayor aceleración negativa.)

87 $1{,}7 \times 10^{-17}$ N

88 a 124 N b 933 N

90 a 1,6 m s^{-2}

b 3,3 N

c (Tensión = 16,4 N)

91 a 4,58 m s^{-1}

b 1570 N

c 2310 N

d Empujar fuertemente sobre el suelo

e El impacto se prolongará durante más tiempo y se reducirá el módulo de la deceleración y la fuerza necesaria para pararlo.

92 a El impacto se prolongará durante más tiempo y se reducirá el módulo de la deceleración y la fuerza necesaria para detenerse.

b Igual que en a. La fuerza se reparte sobre un área mayor, reduciendo la presión.

93 a 230 m s^{-2}

b 0,14 s

94 El aire en movimiento procedente del ventilador colisionará con la vela y ejercerá una fuerza hacia delante. Pero a la fuerza hacia delante que hace el ventilador sobre el aire se opone una fuerza igual y de sentido contrario del aire sobre el ventilador. La fuerza resultante sobre el barco también dependerá de cómo atraviesa la vela el flujo de aire.

95 Las dos fuerzas actúan sobre el mismo objeto y son dos tipos distintos de fuerza.

97 El peso será el mismo.

98 a 59 J b 130 J

99 29 J

100 a 54 N b 140 J

101 0,11 J

102 a Tu propio peso (digamos unos 600 N); 20 cm
b 60 J
b i 0,55 J ii ≈ 2,2 J
c Se invierte en calentar el plástico.
104 a 320 N m^{-1}
b 1,0 J
c 33 cm
d Una masa de 10 kg ejercería una fuerza de 100 N aproximadamente, que está muy por encima del intervalo que se representa en la gráfica; es posible que el muelle no continúe estirándose de forma proporcional a su carga para una fuerza de tal magnitud.
106 a Altavoz
b Batería
c Central nuclear
d Micrófono
e Llama
f Coche
g Arco y flecha
h Generador eléctrico
i Fogón de gas
j Célula fotovoltaica
(Existen otras respuestas posibles)
107 a $2{,}0 \times 10^6$ J
b La intensidad del campo es ligeramente inferior en la cima de la montaña; la diferencia es demasiado pequeña para que afecte a la respuesta.
108 a $1{,}5 \times 10^7$ J
b La energía se disipa en el motor eléctrico a causa de la fricción y de la resistencia del aire.
109 a $5{,}1 \times 10^6$ J
b Cuando el ascensor baja, un gran porcentaje de la disminución de la energía potencial gravitatoria se transfiere al contrapeso que asciende, en lugar de ser disipada en forma de energía interna.
110 a i 130 J ii 2100 J
b 3000 J
111 15 m s^{-1}
112 $4{,}1 \times 10^{-18}$ J
113 900 kJ
115 a 7,5 cm
b 0,37 J
c 20,1 N, si no se estira en exceso (deformación inelástica)
116 Aproximadamente 100 J
117 1,27 m
118 10 m
119 a 22 m
b La medida del tiempo con exactitud; la determinación de cuándo ha alcanzado la pelota la altura adecuada; la pelota no se lanza desde el nivel del suelo.
120 a 2,8 m s^{-1}
b 2,8 m s^{-1}
c Recorre una distancia menor a una velocidad media mayor porque tiene una aceleración mayor (la componente media del peso hacia abajo de la pendiente es mayor).
121 a Energía de tensión elástica
b Energía potencial gravitatoria a energía cinética; a energía de tensión (y energía interna); a energía cinética; a energía potencial gravitatoria. Se supone que la resistencia del aire es despreciable.
c 4,4 m y 3,4 m
d 22 cm; suponiendo que pierde la misma fracción de su energía cinética cada vez que se balancea.
122 1,1 m s^{-1}
123 0,116 m
124 3,4 m
125 $1{,}1 \times 10^4$ N m^{-1}
126 $3{,}0 \times 10^5$ N
127 La fuerza media ejercida en el accidente se puede calcular a partir de la energía cinética antes de la colisión dividida entre la distancia que los vehículos «se abollan»; cuanto mayor es la deformación, menor es la fuerza.
128 a 16000 J
b El trabajo realizado para estirar la cuerda
c Incrementos iguales en la fuerza producen elongaciones cada vez menores (excepto para los primeros 250 N); la cuerda se tensa.
d Aproximadamente 25 m
129 a 2790 J
b Probablemente no, porque se trata de una masa muy grande que cae una altura relativamente pequeña
c 3400 N
130 Para aumentar la longitud (y el tiempo) del impacto, de modo que se reduzca la fuerza y se eviten lesiones en las rodillas y en las piernas.
131 a 6700 N
b El martillo se acaba parando.
132 a 240 J
b 13 W
133 Aproximadamente 25 kW
134 1400 N
135 a $1{,}7 \times 10^8$ W
b 170000 hogares
136 900 MW
137 a 338 N
b 54 N; la fricción contribuye a detener el deslizamiento de la caja hacia abajo de la rampa cuando se reduce la fuerza.
c 830 J
d 0,86 (86%)
138 $1{,}0 \times 10^7$ kg m s^{-1} hacia el oeste
139 $3{,}3 \times 10^3$ N
140 a 8,5 kg ms^{-1}
b 8,5 kg ms^{-1}
c 26 m s^{-1}
141 a 6800 N s b 12 m s^{-1}
142 a 5 m s^{-1} hacia la izquierda
b 2,5 kg m s^{-1} hacia la izquierda
c 7,4 N hacia la izquierda
d La fuerza varía (linealmente) desde 0 hasta 14,8 N en 0,17 s; después vuelve a cero en otros 0,17 s
e Tiempos más cortos; fuerzas mayores
f Idéntico, excepto que las fuerzas van en sentidos opuestos
143 a 2100 N
b 520 kg m s^{-1}
c 26 km h^{-1}
145 a $3{,}39 \times 10^4$ kg m s^{-1}
b 100 J
c $9{,}11 \times 10^{-31}$ kg
146 0,45 m s^{-1} hacia la izquierda
147 a 5,35 m s^{-1}
b En estas circunstancias la resistencia del aire es prácticamente insignificante; por tanto, la velocidad real estará cerca del valor predicho.
c Unos 5×10^{-23} m s^{-1}; no se puede medir
148 260 m s^{-1}
149 La bala no es un sistema aislado; sobre ella actúa la fuerza externa de la gravedad; la Tierra pierde una cantidad equivalente de momento.
150 Se mueve en sentido opuesto con una velocidad de 2,0 cm s^{-1}; se necesita una fuerza externa para detener su movimiento.
151 22,8 cm s^{-1}; en la dirección y sentido original de A
152 a 1,8 m s^{-1}
b La energía (cinética) total de las balas aumentaría.
153 En la marca de los 20 cm de la regla
154 a 340 N
b 0,034 m s^{-2}
c 10000 N s
d 1,0 m s^{-1}
156 a 11,9 m s^{-1} b 95%
157 a 0,6 m s^{-1} b 0,35 J
159 a 1,0 m s^{-1} b 99%

3 Física térmica

1 a 331 K; 184 K b 38 K
2 a 127 °C b 32 cm^3
3 a Probablemente no; puede que estén a la misma temperatura, pero son substancias diferentes; probablemente tendrán distinto número de moléculas con distintas masas y velocidades.
b Probablemente no; substancias diferentes requieren cantidades de energía también diferentes para un mismo aumento de temperatura.
a i Una fuerza de atracción relativamente intensa tiende a juntar de nuevo las moléculas
ii Una fuerza de repulsión intensa separa las moléculas.
b Las fuerzas entre las moléculas de gas son mucho menores, prácticamente cero.
c Si la separación es diez veces mayor en cada dimensión, el volumen medio ocupado por una molécula de gas debe ser 10^3 veces mayor que el ocupado por una molécula de sólido.
5 Cada «chispa» es tan pequeña que contiene muy poca energía interna, aunque esté a una temperatura muy elevada. Si una chispa entra en contacto con la piel le transfiere únicamente una cantidad muy pequeña de energía térmica porque se enfría rápidamente.
6 $9{,}5 \times 10^4$ J
7 1 370 J kg^{-1} K^{-1}
8 4,8 K
9 34°C
10 $4{,}8 \times 10^4$ J
11 40 °C
12 128 s
13 23°C
14 41°C
15 980 W
16 a 3 670 J
b Para alcanzar el equilibrio térmico con el horno
c Para reducir la energía térmica transferida al entorno
d 313 J kg^{-1} K^{-1}
e Para asegurar que todo estaba a la misma temperatura
f Subestimación; la temperatura final hubiera sido mayor si no hubiera habido transferencia de energía al entorno.
17 $4{,}37 \times 10^5$ J kg^{-1}
18 a 38,3 °C
b Toda la energía térmica que fluye desde el agua caliente se transmite al agua fría, no se disipa hacia el entorno
19 17,3 °C
20 320 s
21 $3{,}4 \times 10^5$ J K^{-1}
22 840 s
23 a $1{,}80 \times 10^5$ J
b 67°C
c Habría habido menos tiempo para que se transfiriera energía al entorno.
24 a 1,4 °C
b Toda la energía cinética de la bala se transfiere en forma de energía interna del bloque y de la bala.
c Si la velocidad se reduce a la mitad, la energía cinética se reduce a la cuarta parte, de modo que el aumento de temperatura sería de 0,36 °C.
25 a 4×10^4 J
b 19,8 °C
c Los aumentos de temperatura son demasiado pequeños para poderlos medir con exactitud.
26 a 1,1 °C
b Suponemos que toda la energía potencial gravitatoria del plomo se transfiere en forma de energía interna del plomo y que no hay transferencia de energía al entorno.
c Se tiene que repartir el doble de energía potencial entre el doble de masa.
27 0,12 °C
28 1 600 J
29 $2{,}56 \times 10^6$ J kg^{-1}
30 Durante la vaporización se tienen que romper más enlaces entre las moléculas que durante la fusión.
31 a i $1{,}2 \times 10^3$ J ii 144 J
b La energía transferida por el vapor cuando se condensa es mucho mayor que la transferida por el agua cuando se enfría
32 a Parte del hielo se fundirá gracias a la energía térmica absorbida del entorno; comparando las dos masas de hielo fundido podemos estimar la cantidad fundida por el calentador en el vaso A.
b $4{,}0 \times 10^5$ J kg^{-1}
c Parte de la energía del calentador se transfiere al entorno.
d Llevar a cabo el experimento en un refrigerador; aislar el aparato.
33 $5{,}2 \times 10^4$ J
34 $8{,}0 \times 10^{10}$ J
35 10 °C
36 a 0,1 N
b $1{,}5 \times 10^5$ N
c Porque hay la misma presión en el interior del cuerpo.
37 A causa del peso adicional del agua que hay encima.
38 a La presión bajo nuestros pies se debe a la fuerza con la que empujamos hacia abajo (nuestro peso, si estamos de pie). La presión en un gas se explica mediante las colisiones moleculares aleatorias con la superficie, que se pueden producir en cualquier dirección.
b La presión en un líquido también actúa en todas direcciones.
39 a $6{,}21 \times 10^{-21}$ J
b 210 °C
c $1{,}20 \times 10^{-19}$ J
40 a 461 m s^{-1} b 493 m s^{-1}
41 a 108 g
b 5,7 g
c 167 mol
d $1{,}4 \times 10^{25}$ moléculas
42 a 0,062 moles
b $1{,}9 \times 10^{11}$ átomos por segundo
43 a 200 kg
b 6 700 moles
c $4{,}0 \times 10^{27}$ moléculas
44 a 10 cm^3
b $1{,}7 \times 10^{-23}$ cm^3
c $2{,}6 \times 10^{-8}$ cm
45 143 g
46 $1{,}71 \times 10^{-2}$ m^3
47 39°C
48 130 moles
49 a 32 g b 0,60 m^3
50 $2{,}1 \times 10^6$ Pa
51 a $2{,}51 \times 10^5$ Pa
b Las moléculas colisionan con las paredes con más frecuencia.
52 a $7{,}56 \times 10^6$ Pa
b En promedio las moléculas viajan más rápido y colisionan con las paredes con más frecuencia y con mayor fuerza.
c El helio puede que no se comporte como un gas ideal a baja temperatura y alta presión.
53 1,7 m^3
54 8/3
55 307 °C
56 Cuando el gas se quema, los gases calientes entran en el globo y desplazan a los gases más fríos y densos fuera de este; así, el peso medio del globo se puede ajustar de manera que sea menor que el empuje hacia arriba.

57 a Las moléculas están más cerca.
b Las fuerzas eléctricas actúan a través del espacio, sin contacto, y en teoría nunca se anulan completamente, aunque se hacen muy pequeñas (despreciables) cuando la separación de las moléculas es mayor que unos pocos diámetros moleculares.
58 a Cuando las moléculas del gas, más caliente, chocan con las moléculas de la superficie, más fría en promedio, la energía cinética se transfiere a las moléculas de la pared.
b La energía interna y la temperatura de la pared aumentan; la energía interna y la temperatura del gas disminuyen.
59 a Las moléculas habrán dejado de moverse y de colisionar con las paredes.
b Un gas se condensa en forma de líquido cuando sus moléculas no tienen suficiente energía cinética para vencer las fuerzas eléctricas entre ellas cuando se acercan.
60 Las gráficas tienen la misma forma pero, para todos los volúmenes a mayor temperatura, las presiones serán mayores.

4 Ondas

1 a 0,872 s b 1,15 Hz c 344
d La incertidumbre absoluta en las medidas se mantiene constante, pero el porcentaje de incertidumbre disminuye cuando las medidas son más grandes en módulo.
2 $3{,}1 \times 10^{-4}$ s
3 a $2{,}0 \times 10^{8}$ Hz
b 200 MHz
4 a i 0 ii 2,4 cm hacia la derecha
b 24 cm
c En contrafase
6 a Probablemente no
b Porque no es probable que la elongación de la goma sea proporcional a la fuerza
8 a 4,0 cm c –1,4 cm
b 0,5 s d +1,4 cm
12 Cada máximo sucesivo tendría menos energía. El periodo permanecería invariable.
14 a 0,155 m
b 4510 m s^{-1}
c En los sólidos las partículas están más cerca y, por tanto, las fuerzas entre ellas son mucho más intensas.
15 a $5{,}4 \times 10^{5}$ Hz
b i $4{,}7 \times 10^{-3}$ s
ii 0,11 s
iii Entre 180 s y 1300 s
16 a $6{,}8 \times 10^{13}$ MHz
b (Los fotones con) mayores frecuencias transfieren más energía.
17 a $5{,}5 \times 10^{-7}$ m
b Verde
c Ultravioleta
18 3,6 s
20 a 0,29 s b Quizá un 50%
21 b La distancia necesaria para cronometrar manualmente es muy superior a las distancias habituales en el interior de un edificio. El sonido experimenta demasiadas reflexiones en el interior de un edificio.
22 A una misma temperatura, las moléculas de los diferentes gases (ideales) tienen las mismas energías cinéticas medias. Esto significa que las moléculas con menos masa deben tener velocidades mayores (de modo que $\frac{1}{2}mv^2$ permanezca constante).
24 a El agua del mar es más densa que el agua destilada.
b 65 s
c Hace siglos no había la contaminación acústica provocada por las actividades humanas en épocas recientes
d 31 m
25 3,2 MHz
26 a Aumenta en un factor 4
b La energía se disipa al entorno.
27 a $4{,}0 \times 10^{4}$ W m^{-2}
b 370 W
c 6,3 minutos
28 a 18 W m^{-2} b 5,2 cm
29 a $5{,}0 \times 10^{-7}$ W b 69 m
30 a 10 m
b No se absorben rayos gamma en el aire.
32 a 200 kW
b La potencia de la ola es proporcional al cuadrado de la amplitud; la eficiencia de la central eléctrica es independiente de la amplitud de la ola.
c 2,1 m
d 35 kW
37 a La amplitud de la onda resultante debería ser el doble de la amplitud de las ondas individuales.
b La resultante debería ser siempre nula.
38 Mirando con las gafas de sol puestas, la luz reflejada por el vidrio o el agua; si las gafas son Polaroid®, la intensidad de la imagen cambiará a medida que las gafas rotan.
39 6,7%
40 63°
41 El cielo se ve azul porque las moléculas de aire dispersan la luz; la dispersión simple, como la reflexión, puede dar lugar a polarización.
43 a 24 mW
b 21 mW
c 11 mW (o casi no afectado)
45 26°
46 Los frentes de onda del agua superficial estarán a 27° respecto a la frontera.
47 a 1,35 b 35°
48 51°
50 Porque eso significaría que las ondas habrían viajado por el medio a una velocidad superior a 3×10^{8} m s^{-1}.
51 a 1,36 b 47,4°
55 La longitud de onda de las microondas es adecuada para la difracción en el caso de aberturas y obstáculos con un tamaño de unos pocos centímetros.
56 60 cm y 600 Hz
57 Interferencia destructiva
58 a Cuando se encuentra a la misma distancia de los dos altavoces, las ondas que recibe han recorrido la misma distancia e interfieren constructivamente. Si se desplaza en cualquier dirección habrá una diferencia de trayectoria entre las ondas y ya no se producirá una interferencia perfectamente constructiva.
b 71 cm
59 Las ondas de las dos fuentes de luz no son coherentes.
60 a Para maximizar la difracción de las ondas que emergen de las rendijas; de modo que se superpongan e interfieran.
b 12, 6, 4, 3 cm…
c Desplazando lentamente el receptor hasta que detecte un máximo adyacente; la diferencia entre las dos trayectorias será igual a la longitud de onda.
61 7,9 m
63 a 58,6 m s^{-1}
b 71,4 Hz
c 0,492 m
64 a i 0 ii π
d 21,6 cm; 127 Hz
e 27,5 m s^{-1}
65 a 2,0 Hz
b La cadena tiene un peso significativo, de manera que la tensión sobre ella no es constante (es mayor en la parte superior).
66 a La velocidad de la onda aumenta porque actúan fuerzas más intensas sobre el sistema.

b La frecuencia fundamental aumenta porque $f = v/l$ y v ha aumentado, pero l se ha mantenido constante.
c La cuerda oscilante se acelerará más lentamente porque tiene más masa.
d La frecuencia fundamental disminuye porque $f = v/\lambda$ y v es menor pero λ se ha mantenido constante.

68 360 Hz
69 338 m s^{-1}
70 0,94 m
71 a 1,49 m
b 342 Hz
c 0,745 m
d Con tubos cerrados por ambos extremos de la mitad de longitud se puede producir la misma frecuencia fundamental.
72 a 346 m s^{-1} b 256 Hz

5 Electricidad y magnetismo

2 a $1{,}4 \times 10^{3}$ N C^{-1}
b $4{,}0 \times 10^{-4}$ N
3 a $2{,}4 \times 10^{-17}$ N hacia fuera del centro de la Tierra
b La fuerza de la gravedad es $8{,}9 \times 10^{-30}$ N (hay un factor diferencia de aproximadamente 10^{13}).
5 a $1{,}7 \times 10^{6}$ NC^{-1} hacia el sur
b $3{,}9 \times 10^{6}$ NC^{-1}
6 a 1,5 cm
b Disminuiría. Porque el papel de las hojas del libro no transfiere tan bien el campo eléctrico como el aire.
c Aproximadamente 0,2 N
d El libro no llena el espacio entre las cargas, no las rodea; se desconocen las propiedades exactas del material del libro.
7 a Actúan tres fuerzas: el peso, la tensión y la fuerza de repulsión entre las cargas.
b $4{,}3 \times 10^{-4}$ N
c 54 nC
8 $3{,}7 \times 10^{-6}$ N hacia la izquierda
9 $5{,}4 \times 10^{-3}$ N, en diagonal hacia fuera del cuadrado
10 $8{,}2 \times 10^{-8}$ N
12 $2{,}1 \times 10^{-11}$
13 Los conductores permiten el desplazamiento de las cargas y por tanto cambia la situación considerada.
14 a 0,25 C b $1{,}6 \times 10^{18}$
15 a 430 C b 830 s
20 $6{,}3 \times 10^{-4}$ m s^{-1}
21 a Para que pase el mismo número de electrones cada segundo por un punto cualquiera de un conductor más fino (de menor diámetro), la velocidad debe aumentar.
b Considerando que los conductores tuvieran las mismas dimensiones y que el módulo de las cargas fuera el mismo, en el caso del semiconductor tendrían que viajar un millón de veces más rápido para una misma intensidad de corriente. En ese caso la velocidad de deriva típica sería de unos 100 ms^{-1}.
22 a $8{,}5 \times 10^{28}$ m^{-3}
23 a +44 V
b El módulo de la d.p. sería el mismo, pero su signo sería negativo, lo que significa que, en el segundo ejemplo, la energía se transferiría *desde* el campo eléctrico.
24 a 517 J
b 9 100 C
c $5{,}7 \times 10^{22}$
25 a 220 V
b 40 C
26 La intensidad de corriente descendería hasta un valor muy bajo porque el voltímetro es un mal conductor. El valor que indicaría el voltímetro sería casi igual a la d.p. a través de la batería.
a i $7{,}7 \times 10^{-17}$ J ii 480 eV
b No; su energía cinética no es lo suficientemente elevada para vencer la fuerza de repulsión.
28 a $3{,}5 \times 10^{-13}$ J b $1{,}0 \times 10^{7}$ m s^{-1}
29 $8{,}0 \times 10^{-16}$ J
30 a $3{,}2 \times 10^{-19}$ J
b 1×10^{19} fotones por segundo
35 9 A hacia la derecha
36 0,1 A, 1,1 A, 2,0 A
37 15 V y 14 V
39 375 V
40 27 Ω
41 $1{,}2 \times 10^{-4}$ A (0,12 mA)
42 136 V
46 a 3,0 Ω b 4,8 V
48 En el resistor de 2 Ω; los resistores de 4 Ω y 6 Ω en paralelo representan una resistencia total de 2,4 Ω, de modo que el voltaje a través de ellos es (solo) un poco mayor que el voltaje a través del resistor de 2 Ω; como $P = V^2/R$, la resistencia más baja, de 2 Ω, es el factor dominante.
49 a Bajo: los dos en serie; medio: solo uno; alto: los dos en paralelo
b 605 W, 1210 W, 2420 W
50 a El amperímetro mostrará una lectura muy baja porque la elevada resistencia del voltímetro impide el paso de una mayor intensidad de corriente; el voltímetro indicará (al menos) 12 V porque tiene una resistencia muy superior a 30 Ω; en un circuito en serie los voltajes están en la misma proporción que las resistencias.
b 4,0 V y 0,4 A
c A causa de la resistencia del voltímetro; la resistencia total entre los bornes del voltímetro no es exactamente 10 Ω, sino que se calcula a partir de las dos resistencias en paralelo.
d 260 Ω
e Que su resistencia es despreciable
51 a 4,3 V
b 5,2 Ω; 3,6 W
c La luz se hace más tenue; la intensidad de corriente se reduce cuando aumenta la resistencia total del circuito.
d 3,4 V (suponiendo R constante)
53 La intensidad de corriente a través de la resistencia de 2 Ω es 0,39 A hacia la izquierda; la de la resistencia de 3 Ω es 1,08 A hacia arriba; la de la resistencia de 4 Ω es 0,69 A hacia la izquierda.
54 a 1,17 m b 120 Ω
55 Son inversamente proporcionales
56 $5{,}5 \times 10^{-4}$ m
57 $2{,}1 \times 10^{-6}$ Ω m
58 a i 0,05 A ii 0,60 W iii 72 J
b 120 Ω
59 a 9,07 A b 220 V
60 a 2×10^{5} W
b Una «pérdida de potencia» de solo 10 W m^{-1} puede parecer muy poca, pero puede ser considerable en cables de mucha longitud.
61 a 150 W
b Calentador, amperímetro y fuente de alimentación conectados en serie; voltímetro conectado al calentador.
62 a 0,86 A
b Se disipa energía a causa de la fricción y del calentamiento resistivo.
63 a 9,68 Ω b 11,4 A
c La resistencia del calentador es menor cuando está más frío.
67 a 6,0 V b 2,4 Ω
c El estudiante no tiene en cuenta que el valor de 6,0 V cambiará cuando se conecte la bombilla porque la resistencia total entre A y B ya no es de 100 Ω.
d 0,28 V; no
e Conectando la lámpara en serie con una resistencia igual (2,4 Ω).
68 a El circuito debería incluir una resistencia variable y un termistor conectados en serie a una fuente

de alimentación; la salida hacia el circuito de control del frigorífico se toma a través de la resistencia variable, de modo que si la temperatura aumenta, el voltaje de salida hacia el circuito de control aumenta a su vez y enciende el frigorífico.
b Frigoríficos, calentadores de agua, estufas, planchas, aires acondicionados, hornos

69 a La energía de la luz libera más electrones libres.
b Si se utilizara una escala lineal no sería posible dibujar o interpretar la gráfica con exactitud para valores bajos (debido a la gran diferencia entre las magnitudes de los diferentes valores)
c $\log R = 5{,}2 - (0{,}8 \times \log I)$
d 2 300 Ω
e 5 200 Ω

70 a 2,02%
b 0,942 V, suponiendo que la resistencia del voltímetro es muy grande
c 0,944 V

71 b 96 Ω
c 0–10 Ω
d 4 V
e Si se usara solo el potenciómetro, el voltaje solo sería de 6 V; la lámpara está en paralelo con la mitad del potenciómetro y su resistencia combinada es menor que la otra mitad del potenciómetro.

72 a 5,5 Ω
b 0,37 A
c La resistencia interna es constante.

73 a 3,9 Ω b 3,0 V
c i 2,0 W ii 0,12 W

74 a 12,5 V
b 0,28 Ω
c 4,7 Ω

75 a Para obtener una potencia mayor a partir de un voltaje menor ($P = VI$).
b El voltaje a través de la batería cae como resultado de los «voltios perdidos» (Ir) a causa de la resistencia interna de la batería.

76 a 48 A
b No hay resistencia en los cables que cause el cortocircuito; resistencia interna constante.
c 580 W
d Un aumento rápido de temperatura; la batería se puede estropear.

77 Normalmente se conectaría un voltímetro al resistor; pero un voltímetro conectado a la batería no mide la d.p. a través de su resistencia interna.

78 a 4,5 V y 3,0 Ω
b 1,5 V y 0,33 Ω

86 a Aproximadamente 107 min
b Aproximadamente 37 000 J
c Aproximadamente 1 000 J

91 a Q hacia abajo; R hacia la derecha
b La intensidad de campo en R es una tercera parte de la de Q (está tres veces más lejos).

92 a La aguja estará más alineada con el eje del solenoide.
b Hacia el noroeste

93 a $4{,}3 \times 10^{-3}$ N
b $7{,}5 \times 10^{-3}$ N
c $8{,}6 \times 10^{-3}$ N
d 0

94 a $2{,}4 \times 10^{-3}$ N m^{-1}
b De oeste a este

95 b 3,1 A

96 a 37° b $9{,}5 \times 10^{-3}$ N

98 a Solo si se mueve paralelamente al campo magnético.
b No es posible porque, a diferencia de las fuerzas magnéticas, las fuerzas eléctricas y gravitatorias existen con independencia de la dirección del movimiento (de hecho, no hace falta que haya movimiento para que existan).

99 a $6{,}8 \times 10^{-13}$ N
b Helicoidal

100 a 1,3 T
b $1{,}1 \times 10^{-25}$ kg
c 70 cm

101 a i 7 450 eV
ii $1{,}19 \times 10^{-15}$ J
b $5{,}12 \times 10^{7}$ m s^{-1}
c $1{,}97 \times 10^{-3}$ T
d 10,5 cm

102 a $1{,}0 \times 10^{7}$ m s^{-1}
b $2{,}0 \times 10^{5}$ V m^{-1}
c Los campos tienen que ser perpendiculares entre sí; y perpendiculares también a la dirección del movimiento de la partícula.

6 Movimiento circular y gravitación

1 a 3,14 (π) rad
b 1,57 (π/2) rad
c 0,785 (π/4) rad
d 1,95 rad

2 240 cm

3 a 0,8727
b 0,08716
c 0,1%

4 a 26 rad s^{-1}
b 4,2 Hz

5 a 0,361 Hz
b 2,27 rad s^{-1}
c 2,99 m s^{-1}

9 No hay fuerza actuando en la dirección de su velocidad instantánea.

10 a 0,093 m s^{-2}
b 0,040 N hacia el centro del círculo
c 17 s

11 a 215,6 m s^{-2}
b 862 N

12 a 10 rad s^{-1}
b 6,0 s

13 a 1 010 m s^{-1}
b $2{,}7 \times 10^{-3}$ m s^{-2}

14 a 4 500 N
b La fricción entre los neumáticos y la vía
c Se necesitará una fuerza cuatro veces mayor y puede que no hubiera la suficiente fricción para proporcionar la fuerza adicional.
d Porque habrá menos fricción.
e La fuerza centrípeta necesaria aumentaría hasta 6 400 N, pero el peso adicional también aumentaría la fricción.

15 a 3,0 m s^{-1}
b 0,53 vueltas (revoluciones) por segundo

16 a 2,1 N
b 637,7 N
c La fuerza de reacción normal que actúa sobre el chico (verticalmente hacia arriba) es 635,6 N.

17 b 0,68 N
c 1,3 m s^{-1}; 1,4 s

18 19 m s^{-1}

19 Alrededor de 4×10^{-11} N

20 6×10^{-4} N

21 $3{,}6 \times 10^{22}$ N

22 $3{,}7 \times 10^{-47}$ N

23 3,7 N kg^{-1}

24 a 8,9 N kg^{-1} b 91%

25 10,3 N kg^{-1}

26 9,81 N kg^{-1}

28 b 1,42 N kg^{-1}

31 6 N kg^{-1} hacia A

34 a $3{,}0 \times 10^{4}$ m s^{-1}
b $5{,}9 \times 10^{-3}$ m s^{-2}
c $2{,}0 \times 10^{30}$ kg

35 a 5 400 s; $7{,}7 \times 10^{3}$ m s^{-1}
b Como están cerca de la Tierra, la comunicación es fácil; se requiere menos energía para ponerlos en órbita; están mejor ubicados para monitorizar la superficie terrestre. Sin embargo, pueden verse afectados por una cantidad muy

pequeña de resistencia del aire; no se mantienen en la misma ubicación sobre la superficie terrestre.

36 $1{,}5 \times 10^{11}$ m

38 44 días

7 Física atómica, física nuclear y física de partículas

1 a $2{,}4 \times 10^{19}$ Hz b Rayos gamma

2 12 cm

3 a $1{,}2 \times 10^{-19}$ J b Infrarrojo

4 $3{,}88 \times 10^{-19}$ J

5 aproximadamente 1×10^{19}

7 a $1{,}61 \times 10^{-7}$ m
b Ultravioleta
c Desde el estado fundamental hasta −5,55 eV
d $1{,}24 \times 10^{-4}$ m

8 a Los átomos gaseosos de distintos elementos absorben frecuencias específicas de luz del espectro de emisión solar.
b Cada elemento tiene su propio espectro de emisión, que es único.

10 Yodo-129: 53 protones, 53 electrones y 76 neutrones
Cesio-137: 55 protones, 55 electrones y 82 neutrones
Estroncio-90: 38 protones, 38 electrones y 52 neutrones

11 $+3{,}20 \times 10^{-19}$ C

12 $^{32}_{16}\mathrm{S}$

13 13

14 a $^{35}_{17}\mathrm{Cl}$ y $^{37}_{17}\mathrm{Cl}$
b Una muestra típica de cloro contiene una mezcla de isótopos y 35,45 es el número de nucleones medio.

16 0,216 MeV

18 $1{,}34 \times 10^{7}$ m s^{-1}

19 Porque tras la desintegración hay tres partículas y cada una se puede mover en una dirección cualquiera. El momento de la partícula beta debe ser igual en módulo y de sentido opuesto a la suma vectorial de los momentos de las otras dos partículas, cuyas direcciones y sentidos pueden tomar diferentes posibilidades.

20 $^{23}_{12}\mathrm{Mg} \rightarrow {}^{23}_{11}\mathrm{Na} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + {}^{0}_{0}\nu$

21 1 cm

22 Como consecuencia de su masa, relativamente grande, las partículas alfa transfieren más energía (que las partículas beta) en las colisiones con los átomos.

23 A una presión más baja se reduce el número de partículas por m^3 en el aire y, por tanto, también disminuye el número de colisiones por centímetro.

24 Las partículas alfa no pueden penetrar las capas externas de la piel, pero cuando se liberan en el interior del organismo entran en contacto directo con órganos y tejidos.

25 a unos 1 500 s^{-1}
b unos 35 s^{-1}

26 a Todas las medidas de radioactividad muestran variaciones aleatorias porque las desintegraciones individuales son impredecibles.
b 0,63 s^{-1}
c Las tasas de recuento bajas presentan un mayor porcentaje de variación que las tasas de recuento elevadas, y por tanto es más probable que no las podamos distinguir de la tasa de recuento variable de la radiación de fondo, que puede tener una magnitud similar.

30 La actividad de un radiosótopo con una semivida corta decrece rápidamente hasta un nivel que es indetectable. Esto significa que la muestra se debe preparar con muy poca antelación.

31 80 min^{-1}

32 a 1/32
b 15/16
c $6{,}25 \times 10^{13}$ Bq
d 160 min
e i 7/8 ii 1/16

33 a 3%
b 1,3 millones de años

34 $4{,}5 \times 10^{16}$ J

35 $2{,}0 \times 10^{-13}$ J

36 $4{,}67 \times 10^{-13}$ kg

37 4,8 MeV

38 7,3 MeV

39 101 MeV

40 8,5666 MeV

41 a 7,7 MeV
b 1 800 MeV

42 b 6,1479 MeV

44 a $1{,}63 \times 10^{7}$ ms^{-1}
b $2{,}94 \times 10^{5}$ ms^{-1}

45 a 236,132 u; 235,918 u
b 0,214 u
c 199,3 MeV
d $8{,}14 \times 10^{9}$ J

46 $^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{p} \rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He}$; 4,96 MeV
$2\,{}^{3}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{1}\mathrm{p} + {}^{1}_{1}\mathrm{p}$; 13,92 MeV

50 Los neutrones no hubieran sido desviados porque no están cargados. Pueden estar involucrados en reacciones que se producen en el interior del núcleo.

52 a Dos antiquarks up (arriba) y un antiquark down (abajo) ($\bar{u}\,\bar{u}\,\bar{d}$).
b Dos antiquarks down (abajo) y un antiquark up (arriba) ($\bar{d}\,\bar{d}\,\bar{u}$).

54 a $u\bar{u}$ (es un pion neutro)
b Un quark up (arriba) y un quark anti-up (anti-arriba) se pueden unir (un pion neutro es inestable y se desintegra rápidamente).

55 Neutrón

58 a nuclear fuerte, nuclear débil, electromagnética (+ gravedad)
b nuclear fuerte, nuclear débil (+ gravedad)
c nuclear débil, electromagnética (+ gravedad)
d nuclear fuerte, nuclear débil, electromagnética (+ gravedad)
e nuclear débil, electromagnética (solo leptones cargados) (+ gravedad)

59 fuerza eléctrica = 9×10^{-9} N y fuerza gravitatoria = 4×10^{-48} N; proporción ≈ 10^{39} : 1

60 La fuerza nuclear fuerte tiene un alcance muy corto y solo actúa entre quarks (y gluones) en el interior del núcleo. La fuerza electromagnética puede actuar sobre *todas* las partículas cargadas.

8 Producción de energía

1 a $1{,}21 \times 10^{4}$ J cm^{-3}
b Mayor; parte de la energía térmica transferida de la quema del combustible se esparce en el entorno en lugar de hacerlo en el agua.

2 a $1{,}1 \times 10^{11}$ J
b 3 600 W
c 27%
d Fábricas, escuelas, oficinas, tiendas, transportes, etc.

3 a 20 g
b 2,7 g s^{-1}
c 710 J g^{-1}

4 a i 31 kg ii $1{,}9 \times 10^{7}$ kg
b 5,41 kg

6 En la primera lista el petróleo y las energías renovables tendrían un porcentaje mayor y las demás fuentes, menor.

9 Alrededor de un 35%

11 a 1 kg de agua a 35 °C
b La fuente de energía debe estar más caliente que su entorno.
c Porque todas las cosas que nos rodean están a temperaturas similares; las diferencias de temperatura no son lo suficientemente grandes como para que tengan lugar transferencias de energía eficientes.

12 57 kg

13 a 6,2 m^3
b 3,7 × 10^5 N
c 1,3 × 10^5 m^3
14 42 MJ kg^{-1}
15 a 34%
b 6,5 × 10^4 kg s^{-1}
c 9300 kg
17 a 1,4 × 10^7 m s^{-1}
b 1,4 × 10^4 m s^{-1}
18 Sus propiedades físicas dependen de sus masas, pero hay apenas un 1% de diferencia entre las masas de los isótopos. En una mezcla cualquiera habrá un solapamiento considerable de los rangos de las energías cinéticas y de los momentos de los isótopos.
19 a 7,6 × 10^{19}
b 2,6 kg
20 a 7,8 × 10^{13} J kg^{-1}
b 2,3 × 10^{12} J kg^{-1}
c El uranio libera aproximadamente 10^5 veces más energía por kilogramo que el carbón.
22 a 3,2 × 10^{10} J
b 0,4 g
23 Los tres isótopos naturales del uranio tienen semividas muy largas; la semivida del uranio-238 es comparable a la edad de la Tierra.
24 La respuesta, sin duda, depende de cuál es el nivel que se considera seguro; por ejemplo, al cabo de unos 60 años el nivel todavía sería el doble del nivel considerado aceptable desde el punto de vista de la seguridad.
25 a 100 000 años es un periodo de tiempo muy largo y la zona puede transformarse en una zona propensa a los terremotos, los volcanes u otros desastres naturales inesperados, así como sufrir cambios espectaculares en el clima.
b Podría existir un pequeño riesgo de que algo fuera mal durante el lanzamiento y se pudiera esparcir material radiactivo sobre una amplia zona del planeta.
26 a 9,2 N
b 2,8 × 10^{27} m s^{-2}
31 Se necesita un aerogenerador de gran tamaño para producir una potencia relativamente pequeña.
32 2,4 × 10^5 W
33 a 10 m s^{-1}
b 320 kW
34 4,4 m
35 a Diámetro = 140 m (suponiendo: eficiencia = 25%, velocidad del viento media efectiva = 8 m s^{-1}, densidad del aire = 1,3 kg m^{-3})
b Cabría esperar que un aerogenerador más grande fuera más eficiente, pero los problemas de diseño y construcción (además del coste económico) de una estructura de un tamaño tan grande podrían ser demasiado importantes.
36 a 400
b 36 km^2
c Para que la presencia de un generador no afecte al flujo de aire sobre los demás.
37 En los cálculos aparece la velocidad del viento elevada al cubo, y el cubo de la velocidad media del viento es mucho menor que la media de las velocidades al cubo.
39 2,2 × 10^6 W
40 1,7 × 10^{14} J
41 a 98 cm
b Toda la lluvia que cae sobre el área circula hacia el interior del lago sin que haya evaporación en la superficie. No son supuestos razonables.
42 6,1 kg
46 a 5,9 × 10^{24} J
b La cantidad total recibida es del orden de 10^4 veces mayor que la energía utilizada.
49 Variación en la actividad solar; variación en la distancia entre la Tierra y el Sol
50 Los tubos metálicos son buenos conductores de la energía térmica; la cubierta de vidrio impide las corrientes de convección; las superficies de color negro absorben bien la radiación térmica.
52 a 0,023 W
b 0,031 A
c 2200
d 0,39 m^2
55 a 9,4 × 10^7 J
b 33 °C
c Toda la energía incidente se transfiere al agua del tanque, no hay transferencia al entorno o retención en el panel solar.
56 c Hay un mayor ángulo de incidencia y más atmósfera que atravesar
60 a 1,8 × 10^{25} W
b Es un cuerpo negro perfecto.
c 0,25 Wm^{-2}
61 a 1,5 m^2
b 700 W
c Conducción desde la piel hacia el aire; convección de corrientes de aire caliente hacia fuera del cuerpo
d El cuerpo también recibe energía térmica procedente del entorno.
62 a 44%
b 75 °C
63 2500 °C
64 a 8,3 × 10^{-7} m
b La luz de la lámpara incandescente es más amarilla/«cálida».
66 a 593 W m^{-2}
b 460 W m^{-2}
67 Aproximadamente 1400 millones de km
68 0,49 W m^{-2}
69 a Diferencia en el crecimiento de árboles y otras plantas; nieve y hielo en invierno; variación en la cubierta de nubes; variación en el ángulo de incidencia
b Variación en la cubierta de nubes; variación en el ángulo de incidencia
70 600 W m^{-2}
71 293 K
72 a 3,6 W m^{-2}
b 65 K
73 a Si la emisividad y el albedo fueran los mismos que para la Tierra, la temperatura sería de unos 160 K.
74 La potencia recibida y la potencia irradiada serían *ambas* cuatro veces mayores.
75 Dióxido de carbono: aproximadamente el 15%; óxido nitroso: aproximadamente el 9%; metano: aproximadamente el 14%
77 a Se necesitan 2,26 × 10^6 J para convertir 1 kg de agua en vapor a 100 °C.
b 1,1 × 10^{12} J
c La energía gravitatoria es mucho menor.
d Alrededor de una hora

9 Fenómenos ondulatorios

1 a 59 cm
2 a 36 N m^{-1}
b 2,1 Hz
c Puede que la fuerza ya no sea proporcional al desplazamiento; las espiras del muelle pueden entrar en contacto.
3 a $T \propto \sqrt{m}$
b se puede determinar k a partir del gradiente de la gráfica ($= 2\pi/\sqrt{k}$).
4 0,045 s; 140 rad s^{-1}
5 450 rad s^{-1}
6 a 7,3 × 10^{-5} rad s^{-1}
b 7,2 rad
7 0,131 s
8 14 cm
9 a 9,2 rad s^{-1}
b 0,68 s
10 a 3,9 m s^{-2}
b La masa experimenta un MVA
11 −3,5 cm y −11 cm s^{-1}
12 a 0,23 m s^{-1} y 1,2 × 10^{-3} J
b −2,9 mm

13 5,63 Hz
14 a 0,39 m s^{-1} b 6,0 cm
15 1,61 m por encima del nivel de marea baja
16 El área bajo la curva para un cuarto de oscilación (desde $v = 0$) equivale a la amplitud.
17 a 4,32 s
b Las aceleraciones son iguales porque $a = F/m$; el péndulo más pesado tiene el doble de masa, pero también el doble de peso.
c La amplitud no afecta al periodo; si la amplitud se duplica, la fuerza de recuperación también se duplica (para amplitudes pequeñas).
d 1,45 rad s^{-1}
e 3,97 J
f 1,75 m s^{-1}
18 0,83 m y 4,44 m s^{-1}
19 a 0,58 s
b 2,2 m s^{-1}
20 El mismo periodo; reducción de la amplitud
21 a Ultravioleta
b Mediante fluorescencia
c $5{,}04 \times 10^{-3}$ rad
22 $5{,}7 \times 10^{-7}$ m
23 0,085 mm
24 a Como la Figura 9.12: los mínimos deberían tener lugar en ángulos de $\pm 7{,}8 \times 10^{-3}$ rad y $\pm 15{,}6 \times 10^{-3}$ rad.
25 a $4{,}5 \times 10^{-3}$ rad
c 1,4 cm
26 La luz que incidiría en las rendijas no sería coherente, monocromática o intensa.
27 1,54 mm
28 a $4{,}8 \times 10^{-7}$ m
b La longitud de onda sería menor que en aire, por tanto, la separación entre los flecos disminuiría.
29 a Para que los orificios tengan aproximadamente el mismo tamaño que la longitud de onda y así alcanzar la difracción máxima en cada rendija.
b Aproximadamente 1 m
30 a El espaciado entre los flecos aumenta.
b El espaciado entre los flecos aumenta.
c El espaciado entre los flecos aumenta.
d Los flecos tendrán bordes coloreados.
31 260 m s^{-1}
33 16,0°
34 80 ranuras mm^{-1}
35 1,6 m
36 a Aproximadamente 1 m
b La velocidad de la luz roja en el cristal es mayor que la de la luz azul, de manera que la primera se refracta menos en el prisma; no obstante, su mayor longitud de onda significa que se requiere un ángulo mayor para introducir la diferencia de trayectoria de una longitud de onda completa necesaria para que se produzca una interferencia constructiva.
37 Dos
38 Porque el triple de la longitud de onda de la luz violeta es menor que el doble de la longitud de onda de la luz roja.
39 a 310 nm
b Ultravioleta
c Mediante fluorescencia o con una célula fotovoltaica adecuada
40 Tendría un efecto similar a la reducción de la separación entre ranuras, de manera que el patrón se extendería.
41 El espaciado entre ranuras no es comparable a la longitud de onda de los rayos X, que son demasiado penetrantes, de manera que atravesarían la rejilla sin verse afectados.
42 Máximos en sen $\theta = 0{,}272$; 0,544 y 0,816
43 0,267°
45 $1{,}10 \times 10^{-7}$ m
46 $4{,}61 \times 10^{-7}$ m o $6{,}92 \times 10^{-7}$ m
47 1,4
50 a Hay menos difracción con lentes de mayor tamaño, ya que reciben más luz.
b A las lentes más grandes les resultaría más difícil enfocar toda la luz en los lugares adecuados de la imagen.
51 El color azul está cerca del extremo del espectro visible con longitudes de onda más cortas y se difracta menos.
52 El aumento del tamaño de la pupila por la noche significa que la difracción se reduce, lo que indica que mejora la resolución; sin embargo, una intensidad de la luz mucho más baja reduce la calidad de la imagen.
53 12 km
54 0,15 m
55 a $1{,}4 \times 10^{14}$ m
b La recta que une las estrellas es perpendicular a la recta que las une a la Tierra.
56 Sí; el ángulo subtendido entre el telescopio y la leyenda del cartel es $1{,}6 \times 10^{-5}$ rad, mucho mayor que $1{,}22\lambda/b$ (aproximadamente 5×10^{-6}).
57 Unos 100 km
59 a 610
b No
c Aumentando la anchura del haz
60 413 Hz
61 338 m s^{-1}
62 31 m s^{-1}
63 a El sonido se hará más intenso a medida que el tren se acerque al punto P (debido a un retraso temporal del sonido para llegar al observador). Se escuchará un tono más alto que el emitido por el tren, que irá bajando a medida que el tren se aproxime (porque la componente de la velocidad hacia el observador disminuye). Cuando el tren atraviese P, estos procesos se invertirán.
b El tono y la intensidad del sonido permanecerán constantes.
64 59 Hz
65 a 3000 Hz
b Se absorben y se dispersan con más facilidad en aire; se difractan y se propagan más; menor velocidad
66 260 m s^{-1}; 12,6 km
68 Se aleja con una velocidad de $8{,}45 \times 10^{6}$ m s^{-1}

10 Campos

1 9,6 V
2 $-4{,}1 \times 10^{8}$ J
3 $2{,}3 \times 10^{10}$ J
4 a $9{,}8 \times 10^{9}$ J
b acercarse
5 24 J
6 240 J kg^{-1}
8 a 7,5 J
b Por la carga
15 La separación entre las líneas de campo se tendría que duplicar y las líneas estarían orientadas en sentido opuesto.
16 Las líneas de campo serían líneas rectas orientadas radialmente hacia fuera del centro. Las líneas equipotenciales serían circulares y cada vez más separadas.
19 −77 pC
21 a $4{,}9 \times 10^{24}$ kg
b $1{,}1 \times 10^{4}$ N
23 a Cualquier ubicación bajo la superficie terrestre tendría masa distribuida alrededor y no solo «por debajo».
b La masa está distribuida uniformemente alrededor del punto central.
24 a $6{,}4 \times 10^{23}$ kg
c −250 MJ
25 a +2,5 nC
b $-3{,}5 \times 10^{-8}$ J
26 a 2200 N
b -4×10^{8} J

27 $8{,}4 \times 10^{-10}$ C
28 $5{,}3 \times 10^{33}$ J
29 a Se tendrían que suministrar $6{,}3 \times 10^{7}$ J a 1 kg para desplazarlo hasta el infinito desde la superficie terrestre
b P: $-1{,}6 \times 10^{7}$ J
Q: $-6{,}25 \times 10^{6}$ J
R: $-3{,}1 \times 10^{6}$ J
c $7{,}6 \times 10^{9}$ J
31 a $3{,}3 \times 10^{6}$ J kg^{-1}
b $1{,}3 \times 10^{7}$ J kg^{-1}
c $2{,}8 \times 10^{7}$ J
d No se tienen en cuenta los campos gravitatorios de Júpiter y sus demás lunas (y el efecto de la delgada atmósfera de Io).
32 $4{,}3 \times 10^{6}$ V
33 14 V
34 68 cm
35 18 N kg^{-1}
40 a 570 V
b 26 nC
41 Aproximadamente 6000 V
42 a $5{,}0 \times 10^{4}$ V m^{-1}
b 0,039 N
c Hacia abajo
d 3000 V
e $2{,}3 \times 10^{-3}$ J
f Gana energía cinética
43 a $1{,}6 \times 10^{-19}$ C
b $7{,}5 \times 10^{-16}$ J
c $2{,}0 \times 10^{5}$ m s^{-1}
45 $2{,}0 \times 10^{-9}$ C
46 a 15,3 N C^{-1} a 17,9° respecto a la dirección del campo debido a q_B
b 8 V
c Positivo
47 a 6×10^{7} m
b 1×10^{27} kg
c $7{,}6 \times 10^{8}$ m
d 0,52 N kg^{-1}
49 a 2,4 km s^{-1}
b Un objeto que escapa de la Luna también tiene que escapar del campo gravitatorio terrestre.
c La Tierra está más cerca que el infinito y atrae al vehículo espacial.
50 10,9 km s^{-1}
51 $6{,}3 \times 10^{10}$ m
52 a $3{,}0 \times 10^{3}$ m
b El radio del Sol es unas 200 000 veces mayor.
53 a La velocidad de escape aumenta aproximadamente en un 1%.
b Se puede considerar insignificante.
54 $4{,}1 \times 10^{3}$ m s^{-1}
55 a 2370 m s^{-1}
b 2,56 h
56 7,15 días
57 $9{,}56 \times 10^{6}$ m
58 a $3{,}17 \times 10^{7}$ s
b La órbita no es un círculo perfecto.
60 a Disminuye
b $E_T = -\frac{1}{2}GMm/r$: si E_T disminuye debe variar hacia un número negativo mayor en valor absoluto, porque r se debe hacer cada vez menor.
c El satélite ganará energía cinética a medida que pierde energía potencial gravitatoria; como va más rápido se encontrará con una mayor resistencia del aire.
61 a El trabajo realizado en contra de la resistencia del aire se transfiere en forma de energía interna del satélite, que se destruye porque se calienta tanto que se vaporiza y/o reacciona químicamente con el aire.
62 a $-4{,}9 \times 10^{10}$ J
b $+2{,}4 \times 10^{10}$ J
c $-2{,}4 \times 10^{10}$ J
d $1{,}1 \times 10^{4}$ m s^{-1}
63 35 800 km
64 a El periodo de rotación de la Luna sobre su propio eje y el de rotación alrededor de la Tierra son iguales.
b $8{,}8 \times 10^{7}$ m
65 Se puede considerar que la duración del día (24 horas) es el tiempo que transcurre entre dos instantes sucesivos en los que el Sol se encuentra en su máxima elevación. La Tierra tarda algo más de 23 horas y 56 minutos en completar una revolución porque también orbita alrededor del Sol.
66 a El tiempo que tarda una señal en recorrer la distancia de ida y vuelta desde la superficie terrestre hasta un satélite geoestacionario es de unos 0,24 s.
b Por ejemplo, comparemos dos satélites situados a 358 km y 358000 km de altura, respectivamente (una proporción de 1/1000): si un transmisor terrestre envía la misma señal a ambos, el satélite geoestacionario recibirá una intensidad de señal 1000^2 (10^6) veces menor, lo que sugiere que se necesitaría una antena de recepción mucho más grande para recibir la potencia suficiente.

11 Inducción electromagnética

1 Porque no tiene electrones libres que se puedan mover para provocar una separación de cargas.
2 a Hacia dentro (o hacia fuera) del plano del papel.
b Perpendicularmente entre los polos del imán o a lo largo de la línea del alambre.
c No está en un circuito.
3 Se debería mover una bobina conectada a un galvanómetro rápidamente cerca del imán o en sus alrededores.
4 a Utilizar un imán más intenso; moverlo más rápido.
b Invertir el movimiento; invertir la polaridad.
5 La corriente circula en sentido contrario.
6 La fem inducida aumenta a medida que lo hace la velocidad del imán que cae y también a medida que el campo magnético que atraviesa la bobina se hace más intenso. La fem cambia de sentido cuando el imán abandona la bobina. El segundo pico es más alto (en valor absoluto) y más rápido que el primero porque la velocidad es mayor.
7 0,35 m s^{-1}
8 0,028 T
9 a 0,19 V
b La componente vertical del campo magnético terrestre es mayor cerca de los polos.
c No; habría el mismo voltaje inducido a través de cualquier cable de conexión.
10 b 3,9 m s^{-1}
c 99 V
d 198 V y 0 V
11 $1{,}3 \times 10^{-5}$ Wb
12 $7{,}2 \times 10^{-4}$ Wb
13 $4{,}5 \times 10^{-4}$ Wb
14 a i La aguja indicadora del galvanómetro se desviará y después volverá a cero rápidamente. En el momento en que se cierra el interruptor y circula corriente por el solenoide, el campo magnético variable a través de las espiras induce una corriente. Cuando la corriente en el solenoide es constante no hay inducción.

ii Igual que en i, pero la desviación de la aguja indicadora será en sentido contrario.
b i La corriente inducida se duplicará.
ii La corriente inducida será mucho mayor.
c La lectura es cero; no hay desviación

15 Aumentar el número de espiras; acercar las bobinas; colocar un núcleo de hierro en el interior de las bobinas; aumentar el módulo de la intensidad de corriente en P.
16 a $8{,}8 \times 10^{-3}$ Wb
b $3{,}0 \times 10^{-2}$ V
17 La amplitud y la frecuencia se duplicarían; la fem inducida máxima se duplica porque la intensidad de corriente en A (y el flujo magnético resultante) varía el doble de rápido.
18 a $4{,}6 \times 10^{-4}$ Wb
b La intensidad del campo magnético en A es despreciable en comparación con la de B.
c 0,12 Wb
d 0,083 V
19 a El plano de la bobina debería ser paralelo a la dirección del campo magnético terrestre.
b $9{,}0 \times 10^{-5}$ V
20 a 760
b La bobina y el solenoide deberían tener el mismo eje.
21 a La variación del producto del flujo magnético
b Las áreas son iguales; el producto del flujo magnético cuando el imán entra en la bobina es igual al producto del flujo magnético cuando la abandona.
23 a $2{,}6 \times 10^{-3}$ Wb
b 125 V
c La respuesta a la pregunta 10 corresponde a la fem inducida *máxima* cuando los lados de la bobina intersecan con el campo perpendicularmente, mientras que la respuesta a la pregunta 23 corresponde al *promedio* durante cada rotación de la bobina.
24 a Las oscilaciones serán aproximadamente armónicas simples.
b Voltaje alterno con la misma frecuencia que en a; los picos del voltaje se producen cuando el imán atraviesa el punto medio de una oscilación.
c El movimiento se frenará porque la energía cinética del imán se transferirá a la corriente inducida.
25 En el tubo se inducen corrientes que generan un campo magnético que se opone al movimiento del imán que cae.
26 a El campo magnético variable que atraviesa el anillo induce una corriente, que genera a su vez un campo magnético que se opone al original; la fuerza resultante sobre el anillo provoca su deceleración.
b Polo norte
c Hacia dentro del plano del papel
d El flujo magnético a través del anillo no varía.
e Los sentidos de la corriente y del campo magnético inducido son opuestos a los correspondientes a la entrada del anillo en el campo magnético.
f Se transfiere en forma de energía interna en el anillo a causa de la corriente que circula por este.
27 a Su movimiento es paralelo al del campo magnético.
b Movimiento más rápido; campo más intenso; hacer un bobinado con más espiras; colocar la bobina sobre un núcleo de hierro.
30 a 7 W
b 89 Ω
31 a 325 V
b 13,2 A
c 9,35 A d 492 W
32 240 V
33 a 469 W
b 1 880 W
c El resistor es óhmico y no se sobrecalienta.
34 a Valor máximo de la potencia = 4,0 kW; V_0 = 350 V; I_0 = 11 A
b Similar a la Figura 12.27; periodo de la variación del voltaje y de la intensidad de corriente = 0,0167 s
36 a 30 espiras c 5,8 W
b 25 Ω d 0,024 A
37 a Relación de transformación = 22/1
b 0,072 A
38 a 1 640
b 0,012 A; 60 W
39 Resistencia de los hilos; coste; intensidad del campo magnético en el núcleo
40 a 69
b 0,15 A
c 89%
d 69 mW
e Porque se calentaría.
41 Las pérdidas de potencia representan un porcentaje más pequeño de la potencia total; el flujo magnético se transfiere de forma más eficiente a través de un núcleo de mayor tamaño; los hilos tienen menos resistencia.
42 Los hilos de cobre pueden ser más finos y más flexibles y las propiedades del cobre son más adecuadas a la hora de hacer conexiones eléctricas.
43 a $3{,}1 \times 10^5$ W
b 4,9 W
44 Se transfiere más potencia (para una intensidad de corriente determinada).
45 Para que la mayor parte de la línea de transporte esté a alto voltaje.
46 a Los cables pesarán menos, lo cual facilitará el soporte sobre las torres metálicas.
b No debe reaccionar ni con el aire ni con el agua.
47 a 2 280
b 4 500 V
c No hay caída de voltaje a lo largo de la línea de transporte; el transformador es 100% eficiente.
48 a El aumento de los efectos de histéresis
b Una menor tasa de variación del flujo magnético
49 a 14 400 V
b $1{,}92 \times 10^5$ W
c 13 A
d 7700 W
e 29 W
51 FBCDEA
54 $5{,}6 \times 10^{-3}$ C
55 58,4 V
56 54 pF
57 $1{,}1 \times 10^{-10}$ C^2 N^{-1} m^{-2}
59 11
61 El área efectiva entre las placas varía.
62 La capacidad es proporcional al área, pero la resistencia es inversamente proporcional al área.
63 Puede suministrar suficiente potencia para un fogonazo intenso de luz en un corto periodo de tiempo.
64 Las imperfecciones que pueda haber en la capa de aislante pueden dar lugar a un flujo de carga y a una descarga disruptiva.
65 $2{,}2 \times 10^{-8}$ J
66 a 36 V
b La fina capa de aislante entre las placas se puede degradar.
67 a 3,9 J
b 2 300 W
69 $6{,}4 \times 10^{-3}$ J

71 a 6000 μF
b 540 μF
73 450 μF
74 a 137 μF
b 0,054 J y 0,042 J
c La energía interna y la energía térmica disipada cuando circula corriente a través de los condensadores.
75 $2{,}7 \times 10^{-2}$ F
77 $1{,}3 \times 10^{5}$ Ω
80 Unos 10 V y 1000 Ω
82 b 77 s
d Una gráfica es una buena manera de evaluar incertidumbres y de mejorar la exactitud.
e 77 mF
83 $3{,}3 \times 10^{-3}$ C
84 5,1 V
85 80 kΩ
86 a 1,3 V
b $1{,}3 \times 10^{-4}$ C
c $2{,}1 \times 10^{-6}$ A

12 Física cuántica y nuclear

1 $1{,}38 \times 10^{24}$
2 2 : 1
3 100
4 a 5×10^{-15} J; 3×10^{4} eV
5 a $4{,}91 \times 10^{14}$ Hz
b $3{,}26 \times 10^{-19}$ J
c $3{,}54 \times 10^{-19}$ J
d No
f $5{,}34 \times 10^{14}$ Hz
7 $2{,}0 \times 10^{-19}$ J
8 a $3{,}62 \times 10^{-19}$ J
b $5{,}5 \times 10^{-7}$ m; luz amarilla
c Rojo
9 $1{,}44 \times 10^{15}$ Hz
11 $3{,}8 \times 10^{-19}$ J; 2,4 eV
13 $6{,}81 \times 10^{-34}$ J s
17 $6{,}6 \times 10^{-34}$ J s
18 $3{,}55 \times 10^{-11}$ m
19 $4{,}95 \times 10^{2}$ m s^{-1}
20 $9{,}0 \times 10^{-7}$ m
21 105 V
22 a La longitud de onda de De Broglie asociada a una partícula es inversamente proporcional a su masa (para una misma velocidad). La masa de un electrón es menor que la de un protón, por tanto la longitud de onda de las ondas de De Broglie asociadas al electrón es mayor.
b Electrón, neutrón, partícula alfa, núcleo de átomo de oro
23 Un aeroplano tiene una masa relativamente grande, por tanto la longitud de onda de las ondas de De Broglie asociadas es demasiado pequeña para ser observada y medida.
25 $6{,}7 \times 10^{-13}$ m
26 0,719 MeV
27 $1{,}3 \times 10^{-15}$ m
28 Con un único fotón no se podría conservar el momento lineal.
32 $2{,}5h/\pi$; $5{,}3 \times 10^{-34}$ kg m^2 s^{-1}
33 a $8{,}5 \times 10^{-10}$ m
b Infinito
34 a $2{,}17 \times 10^{-18}$ J
b $-4{,}34 \times 10^{-18}$ J
c $-2{,}17 \times 10^{-18}$ J
d −13,6 eV
e Se tendría que suministrar energía al átomo para separar el protón y el electrón y cuando están separados decimos que tienen energía potencial cero.
35 a $4{,}5 \times 10^{14}$ Hz
b Luz roja
c 0,66 eV
37 $1{,}1 \times 10^{-34}$ kg m s^{-1}
39 $5{,}8 \times 10^{7}$ m s^{-1}
40 $1{,}46 \times 10^{-33}$ m
41 $3{,}7 \times 10^{-19}$ eV
42 5×10^{-25} kg m s^{-1}; 1 eV
43 a $1{,}3 \times 10^{-8}$ J
b $1{,}2 \times 10^{-18}$ m
c El principio de incertidumbre solo permite una corta vida para la partícula de intercambio como consecuencia de su gran masa-energía.
44 10^{-17} s
47 10^{-17} s
51 a $1{,}66 \times 10^{-13}$ m
b $6{,}09 \times 10^{-14}$ m
52 $2{,}0 \times 10^{7}$ m s^{-1}
54 26°
55 65000 MeV
56 Es la separación a la que la fuerza nuclear fuerte atractiva tiene igual módulo y sentido opuesto a la fuerza eléctrica repulsiva.
57 a $7{,}0 \times 10^{-15}$ m
b $3{,}0 \times 10^{-15}$ m
c Concuerdan; se diferencian en menos del 2%.
58 6 : 1
59 Aproximadamente 10^{-13}
60 Aproximadamente 200 m
61 Las masas de cada uno de los *A* protones y neutrones son aproximadamente iguales a *u*, pero varían dependiendo de la energía de enlace de los núcleos en los que se encuentran.
63 a Las energías nucleares características son del orden de 10^{5} veces mayores que las energías características de los electrones.
b $1{,}4 \times 10^{-11}$ m
c Radiación gamma
64 b $7{,}97 \times 10^{-12}$ m y $4{,}78 \times 10^{-11}$ m
65 0,27 MeV, 0,19 MeV y 0,08 MeV
66 $4{,}2 \times 10^{-9}$ s^{-1}
67 $8{,}0 \times 10^{4}$ Bq
69 $6{,}36 \times 10^{23}$ átomos
70 a 126 Bq
b 805 núcleos
71 a $2{,}49 \times 10^{-3}$ h^{-1}
b La pequeña diferencia entre las dos tasas de recuento se verá afectada por fluctuaciones aleatorias en la actividad de la fuente y en el recuento de la radiación de fondo.
72 a 1,9 s^{-1}
b 130 s^{-1}
c La radiación se puede absorber en aire; puede que no se recuente toda la radiación que atraviesa el detector.
73 12 minutos
74 $4{,}8 \times 10^{-9}$ g
75 a $1{,}210 \times 10^{-4}$ $años^{-1}$
b 30%
76 0,26 semanas
77 a 0,42 años
b 190 años
78 5,3 años
79 23 s^{-1}
80 a 49,5%
81 1620 años
84 2/3

Respuestas a las preguntas de examen de los capítulos 1 a 12

1 Medidas e incertidumbres

Hoja 1

1 B 2 B 3 C 4 A 5 C
6 C 7 A 8 A 9 B 10 C

2 Mecánica

Hoja 1

1 B 2 B 3 C 4 D 5 C
6 B 7 C 8 A 9 C 10 C
11 C 12 A 13 B 14 C 15 B
16 C 17 D 18 A 19 D

Hoja 2

1 a La ecuación solo se puede utilizar para un movimiento cuya aceleración sea constante; la fuerza sobre la bala es variable, por tanto la aceleración no puede ser constante.
b i $6{,}6 \times 10^4$ m s^{-2}
c i 280 m s^{-1}
ii 0,26 MW
d La tercera ley de Newton afirma que para toda fuerza existe otra fuerza de igual módulo y sentido contrario que actúa sobre un cuerpo distinto; las fuerzas sobre la bala y la pistola conforman un par de fuerzas de la tercera ley de Newton y por tanto la fuerza hacia delante sobre la bala es igual a la fuerza hacia atrás sobre la pistola.

2 a 1,8 m
b La velocidad inicial se mantiene horizontal; la curva es más escarpada que la original porque la distancia horizontal recorrida a una altura determinada se hace cada vez menor en comparación con la que correspondería sin resistencia del aire.
a i cero
ii En el diagrama se deberían representar: las fuerzas de reacción normales que actúan verticalmente hacia arriba desde el suelo sobre ambas ruedas; el peso de la bicicleta actuando hacia abajo desde su centro de masas (aproximadamente); la fuerza del pie empujando el pedal hacia abajo (también se puede incluir el empuje hacia abajo de las manos); las longitudes totales de los vectores hacia arriba y hacia abajo deberían ser aproximadamente iguales.
iii La fuerza hacia delante sobre la bicicleta es de igual módulo y de sentido contrario a las fuerzas resistivas (resistencia del aire/resistencia aerodinámica/fricción); por tanto, la fuerza resultante es cero y no hay aceleración.
b 320 W
c i 0,57 m s^{-2}
ii 56 m
iii La fuerza resistiva total no es constante (tal como se ha supuesto en el cálculo); la resistencia del aire disminuye con la velocidad (la fuerza de frenado también puede variar).

4 a El coeficiente de fricción dinámica se aplica a superficies en las que hay un movimiento relativo. El coeficiente de fricción estática es el valor máximo justo antes de que se inicie el movimiento.
b 29°

3 Física térmica

Hoja 1

1 C 2 B 3 D 4 A 5 A
6 B 7 A 8 D 9 A 10 D

Hoja 2

1 a $3{,}8 \times 10^5$ J kg^{-1}
b La energía térmica se transfiere al calorímetro y al entorno, de manera que queda menos energía disponible para la ebullición del líquido (que la utilizada en el cálculo).
a i La energía interna es la suma de la energía potencial más la energía cinética de los átomos de cobre; el calentamiento es la transferencia de energía térmica al cobre desde una fuente más caliente.
ii 240 J kg^{-1} K^{-1}
b i Las moléculas adquieren energía y se mueven más rápido.
ii En promedio, cada colisión molecular con las paredes ejerce una fuerza mayor; por tanto, para que la presión se mantenga constante, la frecuencia de las colisiones debe disminuir, lo que significa que el volumen debe aumentar.

3 a presión baja, temperatura moderada y densidad baja.
b $1{,}72 \times 10^5$ Pa
c Parte del agua se evaporaría y la presión y el volumen serían mayores.

4 Ondas

Hoja 1

1 C 2 C 3 A 4 C 5 C
6 D 7 C 8 D 9 C 10 C
11 D 12 C 13 B

Hoja 2

1 a i Una onda que transfiere energía al propagarse desde una fuente.
ii amplitud = 4,0 mm; longitud de onda = 2,4 cm; frecuencia = 3,3 Hz; velocidad = 8,0 cm s^{-1}
b i 63°

ii Los tres frentes de onda son paralelos entre sí, equidistantes y más cercanos entre sí que en el medio A. Deberían formar un ángulo de (aproximadamente) 27° con la frontera. Dos de los frentes de ondas deberían ser continuos con los dos frentes principales de A.

2 a • La gráfica es una línea recta que pasa por el origen, lo que indica que la aceleración es proporcional al desplazamiento.
• La gráfica tiene un gradiente negativo, lo que indica que la aceleración y el desplazamiento tienen sentidos opuestos.

c i La onda es progresiva porque transfiere energía; las oscilaciones del medio son paralelas a la dirección de la transferencia de energía.

ii 0,94 m

3 a No hay transferencia de energía; todas las oscilaciones entre nodos están en fase; la amplitud se mantiene constante en cada posición (ignorando la disipación de energía).

b 450 Hz

5 Electricidad y magnetismo

Hoja 1

1	B	2	B	3	A	4	D	5	D
6	D	7	D	8	C	9	D	10	B
11	C	12	A	13	B	14	A	15	C

Hoja 2

1 a La pila se debería conectar entre los extremos del resistor variable; la lámpara y el amperímetro se deberían conectar en serie entre uno de los extremos del resistor variable y su contacto deslizante; el voltímetro se debería conectar en paralelo con la lámpara.

b Una curva que pasa por el origen (puede ser recta al principio) y en la que incrementos iguales en el voltaje dan lugar a incrementos cada vez menores en la intensidad de corriente.

2 a i $\text{resistencia} = \dfrac{\text{diferencia de potencial}}{\text{intensidad de corriente}}$

ii 54 Ω

b Existen muchas posibilidades: por ejemplo, uno de los calentadores en serie con un interruptor conectado a la fuente de alimentación y los otros dos calentadores en paralelo, conectados a la fuente de alimentación con un interruptor en serie con la combinación.

3 a Los electrodos metálicos de dos metales distintos insertados en la patata y el resistor variable y el amperímetro en serie con los electrodos. El voltímetro conectado a los electrodos.

b Voltaje (d.p.) e intensidad de la corriente, así como su variación temporal.

4 a $2{,}5 \times 10^{-14}$ N

b La fuerza es siempre perpendicular al movimiento, de modo que la trayectoria describirá un arco de circunferencia, curvada hacia abajo.

6 Movimiento circular y gravitación

Hoja 1

1 B 2 A 3 A 4 D 5 C 6 D 7 D

Hoja 2

1 a intensidad del campo gravitatorio = $\dfrac{\text{fuerza gravitatoria}}{\text{masa}}$

b i $g = \dfrac{GM}{R^2}$

ii $1{,}9 \times 10^{27}$ kg

2 a fricción

b 17 m s^{-1}

c La fuerza de reacción normal que ejerce la superficie sobre el coche tendrá una componente que actúa hacia el centro del círculo.

7 Física atómica, física nuclear y física de partículas

Hoja 1

1	D	2	C	3	B	4	D	5	A
6	D	7	C	8	B	9	D	10	A
11	C	12	B	13	D				

Hoja 2

1 a i La desintegración radiactiva natural es la emisión de partículas y/o radiación electromagnética por parte de un núcleo inestable; no se ve afectada por la temperatura o por el entorno. La desintegración radiactiva es un proceso aleatorio espontáneo con una probabilidad de desintegración constante (por unidad de tiempo); la actividad/número de núcleos inestables de una muestra disminuye exponencialmente.

ii «Ionizante» significa que cuando la radiación colisiona con un átomo neutro, provoca la liberación de uno o más electrones y deja el átomo cargado positivamente, es decir, lo convierte en un ión cargado (positivamente).

b i fisión

ii El U estaría representado cerca del extremo derecho de la curva; el Sr y el Xe entre el U y el máximo, con el Sr a la izquierda del Xe.

iii 7,60 MeV ($1{,}22 \times 10^{-12}$ J)

iv La energía de enlace de los neutrones es cero porque son partículas independientes.

2 a i $^{220}_{86}\text{Rn} \rightarrow {}^{216}_{84}\text{Po} + {}^{4}_{2}\text{He}$

ii $1{,}01 \times 10^{-12}$ J

iii $E_C = \frac{1}{2}mv^2$; $1{,}01 \times 10^{-12} = \frac{1}{2} \times 4 \times 1{,}66 \times 10^{-27} \times v^2$; $v = 1{,}74 \times 10^7$ m s^{-1}

b i El núcleo de polonio se mueve en sentido contrario a la partícula α

ii Por la ley de conservación del momento lineal, $m_\alpha v_\alpha = m_p v_p$:
$v_p = \dfrac{4}{216} \times 1{,}74 \times 10^7 = 3{,}22 \times 10^5$ m s^{-1}

iii El núcleo de polonio tiene un momento lineal hacia delante; si la partícula α se emite en la misma dirección del movimiento, el núcleo de polonio no experimenta cambio de dirección; pero si la partícula α se emite en cualquier otra dirección, el núcleo de polonio se desviará de su trayectoria original.

c i La desintegración es un proceso aleatorio, por tanto no se puede afirmar cuándo se desintegrarán los núcleos.

ii La semivida (o periodo de semidesintegración) es el tiempo que tardan en desintegrarse la mitad de los núcleos radiactivos de una muestra.

8 Producción de energía

Hoja 1

1 A 2 D 3 C 4 C 5 A
6 B 7 B 8 D 9 C 10 D

Hoja 2

1 a Carbón, petróleo, gas
b La tasa de producción natural de estos combustibles es mucho menor que su tasa de uso, por tanto se agotarán.
c Mediante la anchura de las flechas: eficiencia = 5/14 = 0,36 o 36%.
d Densidad de energía elevada; disponibilidad inmediata; fuente barata de energía eléctrica; utilizados de forma generalizada en el transporte, etc.

2 a i infrarrojos
ii El dióxido de nitrógeno absorbe la radiación infrarroja que irradia la superficie terrestre. Esta radiación se irradia de nuevo en direcciones aleatorias, de manera que se reduce la energía irradiada neta transferida fuera del planeta.

b $\text{emisividad} = e = \dfrac{\text{potencia irradiada por una superficie}}{\text{potencia irradiada por un cuerpo negro con la misma temperatura y área}}$

$\text{albedo} = \dfrac{\text{potencia dispersada total}}{\text{potencia incidente total}}$

d i 154 W m^{-2} ii 402 W m^{-2}
e 2 K

9 Fenómenos ondulatorios

Hoja 1

1 A 2 D 3 C 4 C 5 D
6 B 7 A 8 D 9 a B b B
10 D 11 B 12 A

Hoja 2

1 a Todos los frentes de onda deberían ser circulares, con sus centros moviéndose entre S y P.
b El diagrama debería mostrar que la longitud de onda que se mueve hacia P es más corta que la que se mueve hacia Q, de manera que en P se escucha una frecuencia más elevada.
c i Efecto Doppler
ii El cambio en la frecuencia del sonido procedente de una sirena de ambulancia cuando pasa por delante de un observador.

2 a difracción
b El máximo central del patrón de difracción de una de las imágenes coincide con el primer mínimo del patrón de difracción de la otra.
c 9,4 × 10^{20} m

3 a l es igual a la diferencia de trayectoria entre los rayos procedentes de los extremos de la rendija; si $l = \lambda$, estos rayos interferirán de forma constructiva, pero los rayos procedentes de la parte superior de la rendija y los rayos procedentes de X interferirán de forma destructiva porque su diferencia de trayectoria será la mitad de una longitud de onda; de forma análoga, se pueden emparejar los rayos que atraviesan la anchura de la rendija para producir interferencia destructiva; por tanto, el primer mínimo del patrón de difracción se producirá cuando $l = \lambda$.
b La forma de onda es idéntica a la primera, pero el máximo central de una coincide con el primer mínimo de la otra.
c Cuanto menor es el valor de λ/b, mejor es la resolución. Como las longitudes de onda de las ondas de radio recibidas son relativamente largas, la anchura de la abertura de recepción (el diámetro del plato) debe ser lo mayor posible.
d Los cálculos indican que no se pueden resolver; el ángulo subtendido por las fuentes en la Tierra es menor que $1{,}22\lambda/b$.

4 a La fuerza debe ser proporcional al desplazamiento y en sentido contrario a este.
b i Tendrá la misma forma que la gráfica de la energía cinética, pero invertida.

10 Campos

Hoja 1

1 C 2 B 3 B 4 C
5 B 6 A 7 A 8 C

Hoja 2

1 a Es el trabajo realizado por unidad de masa para llevar una masa pequeña de prueba desde el infinito hasta ese punto.
b 7,8 N kg^{-1}
c 7,9 × 10^3 m s^{-1}

2 a i La intensidad del campo es constante en A y decreciente en B.
ii Porque si se cruzaran significaría que la fuerza actuaría sobre una carga en ese punto en dos direcciones diferentes a la vez.
b (Véanse las líneas de campo de color rojo de la Figura 10.10)

3 a Porque el infinito se escoge por convenio como el lugar en el que el potencial es cero y, como las fuerzas gravitatorias son siempre atractivas, se tiene que realizar un trabajo para desplazar una masa cualquiera hasta la posición donde su potencial es cero.
b +31 nC
c 2800 V
d 2800 V

11 Inducción electromagnética

Hoja 1

1 A 2 C 3 B 4 C 5 B 6 D
7 B 8 B 9 A 10 C 11 C 12 D 13 B

Hoja 2

1 a La ley de Faraday afirma que la fem inducida es proporcional a la tasa de cambio del flujo (producto del flujo magnético); en este ejemplo, la corriente alterna del cable genera un campo magnético variable a su alrededor, de manera que la bobina es atravesada por un flujo magnético variable (con el tiempo).
b La gráfica debería tener la misma forma y frecuencia que la gráfica de la intensidad de corriente, pero con un desplazamiento de fase de $\pi/2$.

c La magnitud de la fem inducida es proporcional al valor rms de la intensidad de corriente (si la bobina está situada siempre a la misma distancia de los cables y con la misma orientación).

2 a i Los electrones se mueven perpendicularmente a través del campo magnético y experimentan fuerzas a lo largo del rodillo, que dan lugar a una cierta separación de cargas. El origen de la fem se encuentra en que se debe realizar un trabajo para mover los electrones.

ii La velocidad a la que el rodillo atraviesa un área de campo magnético.

b i 2,0 mT

ii La ley de Lenz afirma que el sentido de la corriente inducida siempre se opone al cambio que la ha originado. En este ejemplo hay una fuerza sobre la corriente inducida en el rodillo en sentido opuesto al de su movimiento.

3 a Condensador, resistor y amperímetro en serie. El voltímetro conectado al condensador.

b 100 s

c La gráfica debería mostrar un decrecimiento exponencial desde un valor inicial de 12 V.

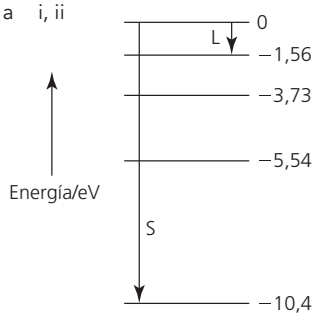
12 Física cuántica y nuclear

Hoja 1

1 D 2 C 3 C 4 B 5 A 6 C
7 A 8 B 9 D 10 A 11 A 12 B 13 D

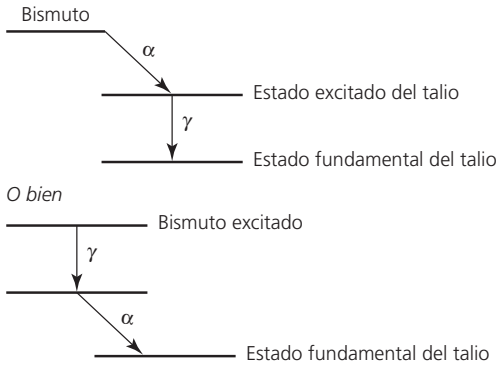
Hoja 2

a i, ii



b $E = \frac{hc}{\lambda}$; $\lambda = \frac{6{,}6 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^{8}}{10{,}4 \times 1{,}6 \times 10^{-19}} = 1{,}20 \times 10^{-7}$ m

c



d $A = A_0 e^{-\lambda t}$; $\frac{1{,}13}{2{,}80} = e^{-80\lambda} = 0{,}404$;

$\lambda = 0{,}0113\ (\text{min}^{-1})$;

$T_{½} = \frac{0{,}693}{0{,}0113} \approx 61$ min

2 a La luz está compuesta por fotones; la energía de cada fotón viene dada por *hf*, donde *h* es la constante de Planck; para desprender un electrón de la superficie metálica hace falta una determinada cantidad de energía, denominada función de trabajo de desprendimiento de electrones φ; si f es menor que φ/*h*, no se emiten electrones.

b i $1{,}1 \times 10^{15}$ Hz

ii $E_C = hf - \varphi = Ve$, por tanto la pendiente de la curva = *h*/*e*
pendiente = $4{,}2\ (\pm 0{,}4) \times 10^{-15}$ lo que da un valor de *h*
$= 4{,}2\ (\pm 0{,}4) \times 10^{-15} \times 1{,}6 \times 10^{-19}$
$= 6{,}7\ (\pm 0{,}4) \times 10^{-34}$ J s

iii φ = *hf*; utilizando el valor de *h* obtenido en *b* ii,
$\varphi = 6{,}7 \times 10^{-34} \times 1{,}1 \times 10^{15} = 7{,}4 \times 10^{-19}$ J
O bien:
A partir del corte con el eje E_C (ampliado),
φ = 4,5(±0,2) eV

3 a i 1×10^{-10} m

ii La longitud de onda es menor/la frecuencia es mayor; por tanto, la energía cinética es mayor.

b i El electrón es atraído por el núcleo; por tanto, se debe realizar un trabajo (sobre el electrón) para separarlo de este; por eso, la energía potencial eléctrica aumenta a medida que lo hace la distancia de separación del núcleo.
O bien:
El potencial debido al núcleo es:
$V = k\left(\frac{Q}{r}\right)$
donde *Q* es la carga nuclear; como $E_P = -Vle|$, la energía potencial del electrón se hace menos negativa a medida que el electrón se aleja.

ii La energía total del electrón es constante; por tanto, la energía cinética disminuye a medida que aumenta la distancia (porque la energía potencial aumenta).

iii Como la energía cinética disminuye, la longitud de onda debe aumentar a medida que el electrón se aleja del núcleo.

Física

John Allum - Cristopher Talbot

El libro de **Física** responde al currículo para la obtención del ***Diploma del Bachillerato Internacional*** y desarrolla un contenido accesible a la vez que profundo, focalizado en el plan de estudios y en su aproximación al aprendizaje.

En **Física** se tratan la totalidad de contenidos correspondientes a los **Niveles Medio** y **Superior**, ambos claramente diferenciados.

- Integración en todas las unidades de la **Teoría del Conocimiento** y de una perspectiva internacional.
- Actividades de autoevaluación que contribuyen a repasar y a consolidar lo aprendido. Cada vez que se introduce un nuevo concepto se incorporan ejercicios resueltos.
- El cambio hacia un enfoque basado en el concepto de aprendizaje, naturaleza de la ciencia, está cubierto al proporcionar un marco idóneo para establecer el diálogo y la discusión.
- Preguntas tipo examen para practicar e incluso preguntas de exámenes de convocatorias anteriores, lo que mejora los resultados de las pruebas para la obtención del *Diploma del Bachillerato Internacional*.

Sobre los autores

John Allum y **Christopher Talbot** son profesores experimentados del **IB Diploma**.

Vicens Vives
www.vicensvives.es

ISBN: 978-84-682-3546-2
12065
9 788468 235462